Lane Medical Library

ÜBER EINE NEUE METHODE ZUR UNTERSUCHUNG DER FORTLEITUNG DES ERREGUNGSVORGANGES IM HERZEN.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

medizinischen Fakultät

der

Großherzoglich Hessischen Ludwigs-Universität zu Giessen

vorgelegt von

Ernst Clement

aus

Seligenstadt (Hessen.)

MÜNCHEN 1912.

ÜBER EINE NEUE METHODE ZUR UNTERSUCHUNG DER FORTLEITUNG DES ERREGUNGSVORGANGES IM HERZEN.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

medizinischen Fakultät

der

Großherzoglich Hessischen Ludwigs-Universität zu Giessen

vorgelegt von

Ernst Clement

aus

Seligenstadt (Hessen.)

MÜNCHEN 1912.

Gedruckt mit Genehmigung der medizinischen Fakultät
: zu Giessen. :

Referent: **Professor Dr. Siegfried Garten.**

Sonderabdruck aus „Zeitschrift für Biologie“. 1912. Bd. 58. Heft 3/4.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA40154005_0290

Über eine neue Methode zur Untersuchung der Fortleitung des Erregungsvorganges im Herzen.

Von

Ernst Clement, cand. med., Assistent am physiol. Institut.

(Aus dem physiologischen Institut zu Gießen.)

(Mit Tafel III—VIII und 21 Textfiguren.)

(Der Redaktion zugegangen am 30. Januar 1912.)

Bei der bisherigen Ableitung der Aktionsströme des Herzmuskels von zwei entfernten Punkten, also von den Vorhöfen oder der Basis einerseits und von der Spitze anderseits, kann man über die Geschwindigkeit und den Verlauf der Erregungswelle im einzelnen keinen sicheren Anhalt gewinnen. Man hat, wie das allseitig betont wird, im Elektrokardiogramm lediglich die Summe einer ganzen Reihe von Einzelerscheinungen vor sich. Allerdings ist von verschiedenen Autoren[1]) versucht worden, aus dem Gesamtbild Rückschlüsse auf die elektrischen Einzelerscheinungen zu ziehen und die Komponenten, aus denen sich das Elektrokardiogramm zusammensetzt, voneinander zu isolieren. Man

1) Nicolai, Ablauf der Erregungsleitung im Säugetierherzen. Zentralbl. f. Physiol. 1907, Bd. 21 Nr. 20. — Derselbe, Die Mechanik des Kreislaufs. Nagels Handbuch der Physiol., Bd. 1. — Kraus und Nicolai, Das Elektrokardiogramm des gesunden und kranken Menschen. Leipzig 1910. — Gotch, Capillary elektrometer records of the electrical changes during the natural beat of the frog's heart. Preliminary communic. Proc. Roy. Soc. 1907, Vol. 79 p. 323.

hat auch, wie das z. B. Gotch [1]) getan hat, verschiedene Punkte der Herzoberfläche für die Ableitung gewählt und dann die Kombination von zwei Punkten auf die mannigfachste Weise variiert. Diese Schlüsse sind aber keineswegs immer zwingend, weil verschiedene Kombinationen verschiedener Größen auch sehr wohl zu demselben Resultat führen können. Eine Möglichkeit, der Frage nach dem Erregungsablauf im Herzen näherzukommen, bestand darin, die elektrischen Vorgänge, die sich an engbegrenzten Stellen des Herzens abspielen, zu untersuchen und die experimentell gewonnenen Resultate zur Erklärung des Elektrokardiogramms heranzuziehen. Auf Anregung und mit Unterstützung von Herrn Prof. Dr. Garten habe ich eine Methode ausgearbeitet, die eine Untersuchung des elektromotorischen Verhaltens von zwei einander sehr nahen Punkten eines erregbaren tierischen Gebildes gestattet.

Zu Beginn der Untersuchungen, die sich zunächst auf das Froschherz beschränkten, wurden zu diesem Zweck die Enden von zwei Baumwollfäden dicht nebeneinander, d. h. in ca. 1,5—2 mm Abstand, auf das freigelegte, schlagende Herz aufgesetzt, und durch sie erfolgte die Ableitung mittels unpolarisierbarer Tonelektroden nach dem Galvanometer. Die Fäden waren mit Ringerscher Lösung getränkt und genügend lang gewählt, um den räumlichen Verschiebungen des Herzens folgen zu können. Bei dieser Art der Ableitung war es aber oft schwierig, ein Aneinanderlegen der Fäden und so einen Kurzschluß zu vermeiden. Aber wenn es auch gelang, die Ableitung während des Herzschlags stets streng von denselben Punkten vorzunehmen, so war damit noch nicht die zweite Forderung erfüllt, von zwei einander möglichst nahen Punkten abzuleiten. Denn da die Fäden einander nicht berühren durften, betrug die Entfernung der Mittelpunkte der beiden Fadenenden im günstigsten Fall immer noch 2—2,5 mm. Eine Isolation durch Glimmerplättchen, die auch probiert wurde, machte das ganze Ableitungssystem zu starr und unnachgiebig. Es wurde deshalb eine möglichst kleinflächige Ableitung in folgender Weise hergestellt:

Ein Baumwollfaden von ca. 0,8 mm Durchmesser wurde scharf mit einer Pinzette geknickt und seine Enden in die Ton-

---

1) Gotch, The succession of events in the contracting ventricle as shown by electrometer records (tortoise and rabbit). Reprinted from »Heart«, Vol. 1, Nr. 3. Januar 1910. p. 235—261.

pfröpfe von zwei unpolarisierbaren Elektroden geknetet. Fig. 1 erläutert die Art der Ableitung. Setzt man die Spitze des Winkels auf die Oberfläche des Herzens, so genügen trotz dieser praktisch

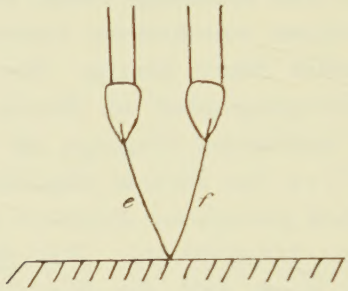


Fig. 1.

nahezu punktförmigen Ableitung die Stromzweige, welche in die Fäden einbrechen, um deutliche Ausschläge der Saite des Galvanometers zu geben. Bei dieser Art der kleinflächigen Ab-

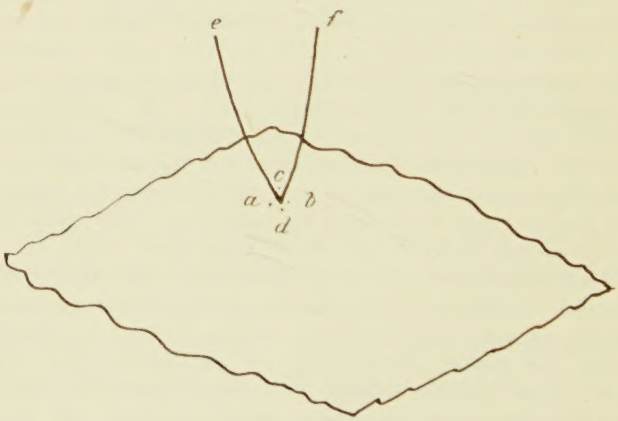


Fig. 2.

leitung werden alle Potentialdifferenzen des berührten Flächenteils zu Strömen in dem Bügel $e—f$ Anlaß geben. Dabei wird aber eine Potentialdifferenz zwischen den Punkten a und b (Fig. 2), die in der durch den Fadenbügel gebildeten Ebene liegen, den stärksten Strom in $e—f$ erzeugen. Der Strom in $e—f$ wird aber Null werden, wenn eine Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten

c und d in einer auf $a—b$ senkrechten Richtung entsteht. Es werden also bei dieser Art der Ableitung die Punkte a und b wesentlich bevorzugt. Es ist weiter klar, daß wegen der geringen Ausdehnung der Elektrode nur Potentialdifferenzen solcher Fasern das Galvanometer in stärkerem Maße beeinflussen können, die ziemlich dicht unter der Oberfläche verlaufen, und daß ferner auch nur ein kleiner Teil der elektromotorischen Kräfte wirksam ist, da ja die Spitze des Fadenwinkels einen sehr guten Nebenschluß zum Galvanometerkreis bildet. An der Berührungsstelle sammelt sich infolge von Kapillarattraktion stets etwas Flüssigkeit an, so daß der Durchmesser der Elektrode (ich nenne sie der Kürze halber D i f f e r e n t i a l e l e k t r o d e) bei meinen Versuchen meist ca. 1 mm betrug.

Prüfung der Methode.

Um die Brauchbarkeit der Methode zu erproben, wurde neben dem in gewöhnlicher Weise abgeleiteten, doppelphasischen Aktionsstrom einer Einzelzuckung vom kuraresierten Sartorius auf demselben Film gleich-

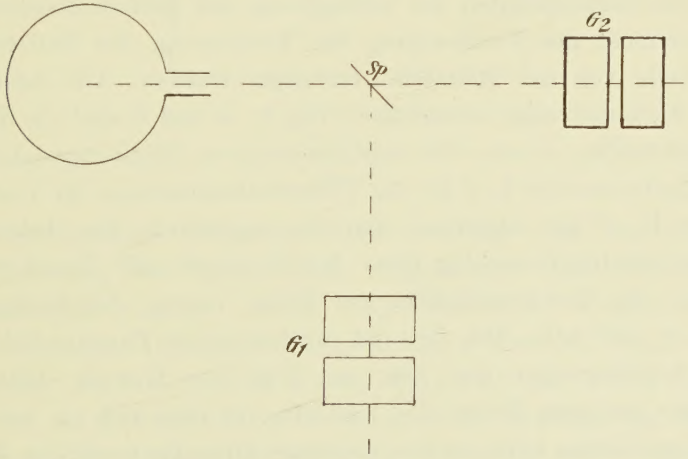


Fig. 3.

zeitig mittels der Differentialelektrode durch ein zweites großes Einthovensches Saitengalvanometer von Edelmann der elektrische Vorgang an einer bestimmten Stelle des Muskels verzeichnet. In der Richtung des einen Saitengalvanometers ($G\,II$) stand das Kymographion (Fig. 3), während die optische Achse des anderen Saitengalvanometers ($G\,I$) mit der von $G\,II$ einen rechten Winkel bildete. Die Drehung des senkrechten Saitenschattens

um 90°, die der vertikale Spalt des Kymographions notwendig machte, wurde mit Reversionsprismen, und die Reflexion der von Galvanometer I kommenden Strahlen durch einen versilberten Spiegel *Sp* bewirkt. Zur Projektion wurden in beiden Saitengalvanometern verwandt: Zeiß-Apochromat 4 mm, korrigiert auf Deckglasdicke 0, und für die obere Saite (Galvanometer II) Zeiß-Projektionsokular 2, für die untere Saite (Galvanometer I stand nämlich dem Kymographion näher) Zeiß-Projektionsokular 4. Das Schattenbild der Saite von Galvanometer II wurde auf die obere, das von Galvanometer I auf die untere Spalthälfte eines Garten schen Photokymographions projiziert, und durch genaue Lotungen kontrolliert, daß die Strahlen von beiden Apparaten in der gleichen Vertikalebene in den Spalt eintraten [1]). Zugunsten einer möglichst raschen Reaktion wurde die Empfindlichkeit durch starkes Spannen der Saiten herabgesetzt, und aus demselben Grunde wurden ausschließlich Quarzsaiten verwandt [2]). Obgleich die Bewegung der Saiten nicht aperiodisch erfolgte, soweit dies bei der Einschaltung eines mehr oder weniger polarisierbaren Gebildes beurteilt werden kann (vgl. Kurve 28 Tafel VIII), dürfte die Entstellung der Kurven nur gering sein, weil es sich bei einem Aktionsstrom doch nie um einen so plötzlich von 0 ad maximum anwachsenden Strom handelt, wie ihn der plötzlich in den Galvanometerkreis einbrechende Eichungsstrom darstellt.

Es kam bei diesen Versuchen darauf an nachzuprüfen, ob sich die Leitungszeiten bei Verlagerung der Differentialelektrode proportional der Veränderung der Entfernung der Differentialelektrode von der Reizstelle verhalten würden. Die Ableitung vom Sartorius zeigt schematisch Fig. 4. *a* und *b* sind die Platinreizelektroden, *c* und *e* die unpolarisierbaren Ableitungselektroden für Galvanometer I, *d* ist die Differentialelektrode für Galvanometer II, *S* der Sartorius. Zur Reizung wurde der absteigende Öffnungsinduktionsschlag eines Induktoriums mit Eisenkern benutzt; die Geschwindigkeit des Films betrug durchschnittlich 2,10 m pro Sek. Die Zeit ist mittels einer Zungenpfeife von 148 Schwingungen pro Sek. am Fuß der Kurven registriert. Bei der größeren Breite des Sartorius, in dem sich ja, wie man wohl annehmen kann, in den einzelnen einander parallelen Fasern die Erregung linear mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzt,

1) Über die Einzelheiten siehe: Garten, Die photographische Registrierung, in Tigerstedts Handbuch der physiologischen Methodik.

2) Siehe Garten, Zusatz zu der Arbeit: Über die zeitliche Folge der Aktionsströme im menschlichen Muskel bei willkürlicher Innervation und bei Erregung des Nerven durch den konstanten Strom. Zeitschr. f. Biol., Bd. 55, S. 239 u. 240.

wurde zur Erzielung größerer Galvanometerausschläge nicht ein geknickter Faden auf den Sartorius aufgesetzt, sondern in derselben Entfernung von der Reizstelle deren drei nebeneinander. Ich beschreibe zunächst eine Versuchsreihe, deren Kurven beigegeben sind, etwas ausführlicher und lasse die genauen Angaben über diese Reihe und einige andere Versuche in der Tabelle I folgen. Der Muskel war auf einen Paraffinblock aufgespannt. Die Platinelektroden *a* und *b* (vgl. Fig. 4) führen

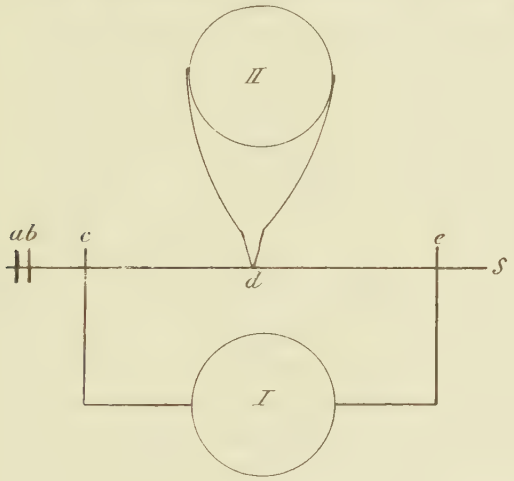


Fig. 4.

den absteigenden Öffnungsinduktionsschlag dem Muskel zu. Die Ableitung des diphasischen Hauptstroms nach dem einen Galvanometer erfolgt mittels unpolarisierbarer Fadentonelektroden *c* und *e*. Die Differentialelektrode *d* wird bei den einzelnen Aufnahmen dem Muskel an verschiedenen Stellen aufgesetzt. Eine Hebung der Saiten entspricht der Negativität eines der Reizstelle näher gelegenen Punktes (bezogen auf den äußeren Stromkreis). In Kurve 1 Tafel VIII (3. 7. IX. 11) verrät sich der Reizmoment in beiden Saitenkurven durch eine kleine Zacke, dann beginnt zunächst unten die erste Phase, bald darauf oben. Entsprechend der großen Nähe der für *d* in Betracht kommenden Ableitungspunkte sehen wir einen sehr rasch verlaufenden diphasischen Strom, der be-

reits zu einer Zeit beendet ist, wo die zweite Phase der unteren Kurve beginnt. Bei der großen Geschwindigkeit der Schreibfläche (vgl. unten am Fuß der Kurve die Schwingungen der Zungenpfeife von $^1/_{118}$ Sek.) sind die beiden Phasen bei der unteren Ableitung, wo die Zwischenstrecke ja 20 mm betrug, weit voneinander entfernt. Über die von der Norm abweichende Form dieser Kurve siehe die Ausführungen unten auf S. 146–150. Bei der Ausmessung der Kurven bin ich in folgender Weise verfahren. Ich habe zunächst die Leitungszeiten für die Strecken $c-d$ in den verschiedenen Kurven aus den Differenzen von $b-d$ und $b-c$ bestimmt und dann diese Werte mit den Zwischenstrecken am Muskel verglichen. In der letzten Kolonne von Tabelle I sind die Quotienten aus der Strecke $c-d$ und der Leitungszeit gebildet worden. Wenn die Strecken $c-d$ und die Leitungszeiten sich einander proportional ändern, muß der Quotient in den einzelnen Versuchsreihen eine Konstante bilden. Die bei der Ausmessung der Kurven erhaltenen Werte stimmen recht gut überein. Selbstverständlich soll mit dem Quotienten, $c-d$: Leitungszeit, keine Bestimmung der Leitungsgeschwindigkeit gegeben werden, da die verschiedene Größe der Ausschläge die Abhebung der Saiten bei gleicher Saitenspannung zu verschiedenen Zeiten merklich werden läßt. Ich habe in der Tabelle lediglich deshalb diese Form des Vergleichs gewählt, weil durch sie am deutlichsten die Genauigkeit der angewandten Methode zum Ausdruck kommt. In Kurve 2, Tafel VIII (2. 7. IX. 11) sind die Ausschläge der oberen Saite, entsprechend der größeren Entfernung der Ableitungsstelle von der Reizstelle und dem damit verbundenen Dekrement nicht mehr so stark wie in Kurve 1. Noch stärker ist dies Dekrement in Kurve 3, Tafel VIII (4. 7. IX. 11), obwohl der Reiz noch verstärkt wurde. Infolge der Verstärkung des Reizstroms durchsetzen die Stromschleifen des Induktionsschlages den Muskel in weiterer Ausdehnung, und die praktische Folge ist ein Näherrücken der Reizstelle an die Ableitungselektroden. Der hierdurch bedingte Fehler wird aber durch die Art der Leitungszeitbestimmung aus der Differenz der Zeiten für bd und bc wieder aufgehoben. Die Resultate dieser Kontrollversuche, wie sie in Tabelle I

zusammengestellt sind, lassen sich dahin zusammenfassen: die Ableitung mit einer Differentialelektrode gestattet eine hinreichend genaue Bestimmung des Eintritts und des Richtungsverlaufs der Erregung an einer engbegrenzten Stelle eines erregbaren tierischen Gebildes.

Tabelle I.

1 Zungenpfeifenschwingung = $^1/_{148}$″. Reizung des kuraresierten Sartorius durch absteigenden Öffnungsinduktionsschlag. RA = Rollenabstand. (Die Ordinaten sind auf den Originalkurven nur sehr fein geschrieben und auf den Kopien meist nicht sichtbar.)

Versuchsnummer und Datum	1 Ordinate in σ	Eichung m. 20 Milliadaniell gab f. Galvanometer II Ausschlag in mm	RA in mm	a—b in mm	b—c in mm	d—e in mm	c—d in mm	Leitungszeit für c—d in σ	$\frac{c-d}{\text{Leitungszeit}}$
7. IX. 11 Temp. 22° C									
3.	0,72	11	7	2,5	7,3	15,5	**4,5**	**2,2**	2,045
2.	0,72	11	7	2,5	7,3	10	**10**	**4,91**	2,036
4.	0,72	11	6	2,5	7,3	6,5	**13,5**	**6,67**	2,024
6. IX. 11 Temp. 21° C									
11.	0,72	20	7	2,5	9,4	9	**9**	**3,72**	2,42
13.	0,72	20	7	2,5	7,2	11,5	**7,7**	**3,21**	2,40
18. IX. 11 Temp. 19° C	1 mm d. Originalkurve in σ								
7.	0,48	17	7,5	2	10	15	**4**	**1,9**	2,105
8.	0,48	17	7,5	2	10	9,5	**9,5**	**4,52**	2,102
9.	0,48	17	7,5	2	10	4	**15**	**7,13**	2,104

Versuche am Herzen.

Gegen die Anwendung der geschilderten Methode auf die Untersuchung der Aktionsströme des Herzens kann man den Einwand erheben, daß infolge der Kontraktion der Muskelfasern doch tatsächlich eine räumliche Verschiebung, ein Aneinanderrücken der unter und neben der Differentialelektrode gelegenen Faserelemente stattfindet. Beim Skelettmuskel ist der Einwand hinfällig; denn hier geht der elektrische Vorgang dem mechanischen voraus. Aber auch für das Elektrokardiogramm behält er nur

für einen Teil, nämlich die T-Zacke, Gültigkeit. Denn die zeitmessenden Versuche von Samojloff[1]) haben wenigstens für den Kaltblüter ergeben, daß die R-Zacke in ein mechanisches Ruhestadium der Herzmuskelfasern fällt[2]). Wie schon erwähnt, war es bei der Ableitung mittels einer Differentialelektrode sehr wichtig, eine räumliche Verschiebung der Elektrodenspitze während des Herzschlags zu vermeiden. Diese Aufgabe wurde häufig durch folgenden Umstand erleichtert. Man beobachtet oft zwischen einzelnen Herzteilen geringe Bestandströme, die für alle Punkte keineswegs konstant sind und sich je nach dem Ort der Ableitung ändern. In solchen Fällen macht sich eine mechanische Verschiebung der Elektrode fast stets durch eine ruckweise Verschiebung der Dauereinstellung der Saite bemerkbar. Ferner wurde eine Verschiebung der Elektrode auch meist dadurch verhütet, daß infolge der geringen Blutung bei der Freilegung des Herzens sehr bald eine Gerinnung und damit eine Fixierung der Differentialelektrode eintrat. Dieses Ankleben der Elektrode mit Blut ist nach mündlicher Mitteilung von Herrn Prof. Garten ein zuerst von F. B. Hofmann angewandter Kunstgriff.

Um bequem und rasch verschiedene Elektrokardiogrammkombinationen auf einem Film gleichzeitig aufnehmen zu können, bin ich auf folgende Art verfahren (vgl. Fig. 5). Die mittleren Klemmen a, b und c, d von zwei Pohlschen Wippen ohne Kreuz, P_1 und P_2, waren mit den Galvanometern G_1 und G_2 verbunden und je zwei Endklemmen i, k und l, m mit den unpolarisierbaren Tonseilelektroden, T_1, T_2, durch die das Elektrokardiogramm in üblicher Weise von den Vorhöfen und der Spitze abgeleitet wurde. Den zwei anderen Klemmenpaaren e, f und g, h wurden die Ströme von zwei Differentialelektroden, D_1 und D_2, zugeleitet, die an zwei verschiedenen Stellen auf die Herzoberfläche aufgesetzt wurden. Wenn z. B. die Differentialelektroden dem Ventrikel an Basis und Spitze aufgesetzt waren, und durch ein Seilelektrodenpaar von Spitze und Vorhöfen abgeleitet wurde, war es durch einfaches Umlegen der Wippen möglich, rasch nacheinander folgende Kombinationen mit den zwei Galvanometern gleichzeitig aufzunehmen: 1. Hauptelektrogramm und Differentialelektrogramm der Basis,

1) A. Samojloff, Weitere Beiträge zur Elektrophysiologie des Herzens. Pflüg. Arch. 1910, Bd. 135, S. 417—468.

2) Auf die Angaben Kahns, Zeitmessende Versuche am Elektrokardiogramm. Pflüg. Arch. 1910, Bd. 132 S. 209—232, kann ich hier nicht näher eingehen, da sie sich auf den Warmblüter und andere Versuchsbedingungen beziehen.

2. Hauptelektrogramm und Differentialelektrogramm der Spitze, 3. Differentialelektrogramme von Basis und Spitze (vgl. hierzu auch Fig. 5). Setzte man eine Differentialelektrode auf eine andere Stelle, so ließen sich auch andere Kombinationen aufnehmen. Die Haupt- und Differentialelektroden waren mit den Galvanometern stets so verbunden, daß eine überwiegende

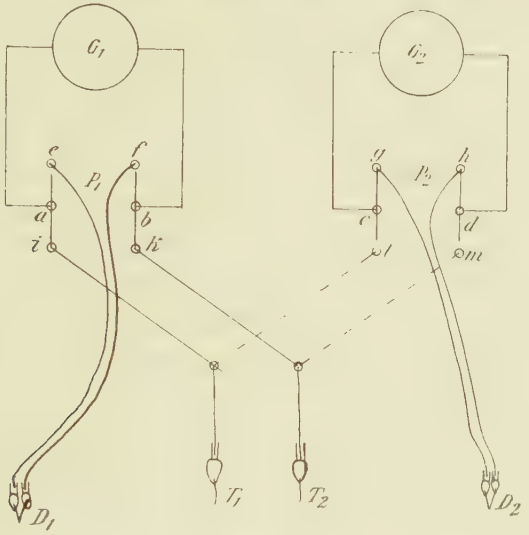


Fig. 5.

Negativität der Basis oder eines nach der Basis zu gelegenen Punktes einer Hebung der Saiten entsprach. Die Empfindlichkeit der Saiten mußte jetzt durch Entspannen größer gemacht werden, als sie bei den Versuchen am Sartorius war. Am Fuß der Kurven ist die Zeit in $^1/_{148}$ und $^1/_5$ Sek. angegeben. Die Ordinaten sind durch rasches Schließen und Öffnen des Spaltes bei stehender Trommel und vorgeschalteter Gelbscheibe erzeugt. Die Vergrößerungen betragen wie in den früheren Versuchen für Galvanometer I ca. 650, für Galvanometer II ca. 670.

Die Differentialelektrogramme von bestimmten Stellen des Frosch- und Schildkrötenherzens weisen eine große Gesetzmäßigkeit in ihrer Form auf; untereinander waren sie verschieden, je nachdem sie an der Basis, in der Mitte oder an der Spitze aufgenommen waren, aber sie zeigten sich stets typisch für die einzelnen Ableitungsstellen. Diese Gesetzmäßigkeit ging so weit, daß wir ohne weiteres aus der Form der Kurve ihre Herkunft mit Sicherheit feststellen konnten. Die Oberfläche eines Froschherzens gewährt nicht allzuviel Bewegungsfreiheit, und ich habe

mich deshalb am Froschherzen in der Hauptsache auf die erwähnten drei Ableitungen beschränkt. Ich teile nun einige Beispiele, die einer großen Zahl sich typisch wiederholender Kurven entnommen sind, mit. Kurve 4, Tafel III (2. 11. X. 11) zeigt oben das Differentialelektrogramm der Basismitte von der Vorderfläche des Herzens links an der Aorten-Wurzel, unten das Hauptelektrogramm, das hier eine auffallend starke *P*-Zacke aufweist. Daß die *P*-Zacke hier mit der zweiten der beiden sich rasch folgenden Kurvenzacken identisch ist, beweist ein weiter unten zu schildernder Versuch an demselben Herzen mit Differentialableitung vom Vorhof. (Vgl. Kurve 14, Tafel VI (5. 11. X. 11). Bei dieser Zacke bleibt die obere Saite vollkommen in Ruhe, während bei *R* ein diphasischer Strom auftritt, dessen erste Phase nach oben und dessen zweite Phase nach unten geht. Die Phasen sind nicht immer kongruent, bald ist die erste höher, bald die zweite. Dieser Befund mag darauf zurückzuführen sein, daß man beim Aufsetzen der Differentialelektrode auf verschiedenen Herzen nicht immer identische Punkte trifft. Dieselbe Form erhielt ich übrigens auch an Schildkrötenherzen (Kurve 5, Tafel IV (10. 20. V. 11), wo vor der ersten Phase noch eine kleine, nach oben gerichtete Vorzacke zu bemerken ist. Auch beim Frosch erhält man mitunter eine derartige, allerdings sehr geringe Vorzacke, und auch in Kurve 4 ist sie ganz schwach angedeutet. Im allgemeinen verläuft die Schwankung rein diphasisch, wie es Kurve 6, Tafel III (11. 6. IV. 11) vom Frosch zeigt. Die *T*-Zacke macht sich im Differentialelektrogramm der Basis meist nur schwach bemerklich als flache, nach oben gerichtete, monophasische Schwankung. Doch betone ich, daß *T* im Differentialelektrogramm der Basis häufig genug negativ ist, selbst wenn *T* im Hauptelektrogramm positiv auftritt. Umgekehrt findet man auch oft gleichzeitig *T* im Hauptelektrogramm negativ und im Differentialelektrogramm der Basis positiv, d. h. die *T*-Zacke im Differentialelektrogramm ist der im Hauptelektrogramm bald gleich, bald entgegengesetzt gerichtet, ob nun *T* im Hauptelektrogramm positiv oder negativ ist. Eine gesetzmäßige Beziehung zwischen der Richtung der *T*-Zacke

in Haupt- und Differentialelektrogramm besteht also nach den von mir gewonnenen Kurven nicht. Zeitlich fällt die *R*-Zacke des Basisdifferentialelektrogramms stets in den Abschnitt, in dem die *R*-Zacke auch im Hauptelektrogramm verläuft. Ein analoges Verhalten ist bei der *T*-Zacke zu beobachten. Man findet öfters, daß die Spitze der *R*-Zacke im Hauptelektrogramm zeitlich mit dem Durchgang der Saite im Differentialelektrogramm durch die Nullinie beim Übergang aus der ersten in die zweite Phase zusammenfällt. Möglicherweise ist aber dieser Befund nur zufällig.

Leitet man mit der Differentialelektrode von der Herzspitze ab, so erhält man ein ganz anderes Bild. *P* macht sich ebenso wie bei Differentialableitung an der Basis nicht bemerkbar. *T* stellt sich als flache, meist nach unten gerichtete, monophasische Schwankung dar. Meist ist sie negativ, wenn *T* im Hauptelektrogramm positiv ist, doch kommt es auch oft genug vor, daß *T* im Differentialelektrogramm positiv und gleichzeitig im Hauptelektrogramm negativ ist, oder daß beide positiv oder negativ auftreten. Eine allgemeine Regel bezüglich der Richtung der *T*-Zacke im Differentialelektrogramm der Spitze läßt sich also ebensowenig aufstellen wie für die Differentialableitung an der Herzbasis. Die *R*-Zacke dagegen kehrt regelmäßig im Differentialelektrogramm als rein diphasische Schwankung, bei der die erste Phase nach abwärts, die zweite nach aufwärts geht, wieder, also gerade umgekehrt wie bei Basisableitung. In Kurve 7, Tafel III (3. 11. X. 1911) sieht man oben das Hauptelektrogramm vom Frosch, unten das Differentialelektrogramm der Herzspitze in Kurve 7a [1]), Tafel V (10. 27. V. 1911) das gleiche bei der Schildkröte. Kurve 8, Tafel IV (2. 18. XII. 1911) zeigt oben das Differentialelektrogramm der Basismitte, unten das der Herzspitze. Es sind wieder die durchaus typischen Formen der Differentialelektrogramme. Vor allem aber erkennt

1) Die kleinen, nach oben gerichteten, unregelmäßig auftretenden Zacken sind auf das Flackern der einen Bogenlampe zurückzuführen.

man, daß beide Schwankungen nahezu gleichzeitig beginnen, soweit die Größe derselben und die Geschwindigkeit der Schreibfläche eine sichere Ausmessung zulassen. Wie man aus den am Fuß der Kurve geschriebenen Zungenpfeifenschwingungen von 148 pro Sek., die auf der hier abgebildeten Originalkurve sehr gut lesbar sind, ersieht, lassen sich Zeitdifferenzen von 3 σ noch sehr gut mit einer Lupe abschätzen. Macht man die Geschwindigkeit der Schreibfläche sehr viel größer, so gewinnt man auch nicht viel dabei. Die Abhebung der Saiten von der Nullinie erfolgt dann so allmählich, daß der Zeitpunkt des Beginns der Saitenbewegung nur sehr schwer festzustellen ist.

Auch das Differentialelektrogramm von der Ventrikelmitte zeigt eine für diese Ableitungsstelle typische Form, die beim Frosch und bei der Schildkröte fast völlig einander gleichen. Jedenfalls bestehen zwischen zwei derartigen Differentialelektrogrammen niemals größere Unterschiede, als sie sich auch zwischen den Differentialelektrogrammen verschiedener Frösche oder verschiedener Schildkröten finden. Von der *P*-Zacke ist in dem Differentialelektrogramm ebensowenig wie in denen von anderen Ventrikelstellen etwas zu bemerken. Die *R*-Zacke erscheint im Differentialelektrogramm der Mitte des Ventrikels als monophasischer, nach oben gerichteter Strom, dem eine kleine gleichgerichtete Vorzacke vorausgeht. Bezüglich der Richtung und Form der *T*-Zacke kann ich nur das schon früher bei den anderen Ableitungen Gesagte wiederholen. Hinzufügen möchte ich nur noch, daß man die Zacke *T* an Basis, Mitte und Spitze häufig nur angedeutet oder auch gar nicht erhält. Auch für das zeitliche Auftreten der *R* Zacke bei Ableitung von der Mitte gilt das schon früher Mitgeteilte. Kurve 9, Tafel VI (4. II. X. 1911) zeigt oben das Differentialelektrogramm der Ventrikelmitte beim Frosch, Kurve 10, Tafel IV (25. 20. V. 1911) das gleiche bei einer Schildkröte. Die Vorzacke ist in der letzten Kurve sehr deutlich ausgeprägt, aber das ist sie auch oft beim Frosch, wie Kurve 11, Tafel IV (3. 18. XII. 1911) zeigt. Auf dieser Kurve ist gleichzeitig oben das Differentialelektrogramm der Basis verzeichnet.

Gelegentlich habe ich dann noch bei Schildkröten auf der Rückseite des Ventrikels mit einer Differentialelektrode von der Basis und der Mitte abgeleitet. Da das Herz emporgehoben und umgeklappt war, lagen die Differentialelektroden natürlich jetzt so orientiert, daß die Negativität eines nach der Basis zu gelegenen Punktes eine Senkung der Saite hervorrief. Ich teile hier zwei Kurven 12 und 13, Tafel V (4. 27. V. 1911, 5. 27. V. 1911) mit, deren Hauptelektrogramme noch mit Hilfe eines mittleren Elektromagnetsaitengalvanometers von Edelmann registriert sind. Entsprechend der umgekehrten Orientierung der Elektroden stehen die Kurven der Differentialelektrogramme einfach auf dem Kopf, zeigen aber sonst den von der Vorderseite des Ventrikels aufgenommenen ganz analoge Formen.

Auch vom Vorhof habe ich öfters Differentialelektrogramme aufgenommen. Die Resultate sind aber bezüglich der Kurvenformen nicht so regelmäßig wie die vom Ventrikel. Offenbar ist die Form der Schwankung außerordentlich abhängig von dem Punkt, den man für die Ableitung jeweilig wählt. Die Differentialelektrode wurde stets so aufgesetzt, daß die Negativität eines kranialwärts gelegenen Punktes einer Hebung der Saite entsprach. Die Verschiedenheit der Kurvenformen geht deutlich aus den hier mitgeteilten Beispielen hervor. In Kurve 14, Tafel VI (5. 11. X. 1911) ist das Differentialelektrogramm von der Mitte des linken Vorhofs vom Frosch wiedergegeben. Hier erscheint die *P*-Zacke in der unteren Saitenkurve andeutungsweise als dreiphasische Schwankung, deren erste und dritte Phase nach unten gehen. Dieselben Formen habe ich bei Schildkröten erhalten. Öfters traten aber auch bei Frosch Kurve 15, Tafel VII (17. 22. IV. 11) und Schildkröte Kurve 16, Tafel VII (2. 27. V. 11) diphasische Ströme auf, deren erste Phase nach unten ging, und deren zweite etwas größere entgegengesetzte Phase ein kleines Gipfelplateau aufwies. Gerade das Differentialelektrogramm vom Vorhof ist ein guter Beweis für die Feinheit der punktförmigen streng lokalisierten Ableitung. Von der großen Zacke *R* und von *T* in Kurve 14 macht sich im Differentialelektrogramm vom Vorhof auch nicht

das geringste bemerkbar, obwohl durch die gute Nebenschließung, welche die Ventrikelströme im Tierkörper besitzen, ein Einbrechen von Stromschleifen in die Differentialelektrode begünstigt wird. Absichtlich aber habe ich auch die Kurven 15 und 16 mitgeteilt, weil bei ihnen das Prinzip der streng lokalisierten Ableitung nicht völlig gewahrt geblieben ist. Man sieht in beiden die *R*-Zacke schwach angedeutet, und dieser Umstand ist dadurch zu erklären, daß die Spitze der Differentialelektrode in diesen Fällen dem Vorhof in zu großer Ausdehnung anlag, wodurch ein Einbrechen von Stromschleifen ermöglicht wurde.

Bei all diesen Versuchen hat natürlich am meisten die Frage nach dem normalen Erregungsablauf im Herzen interessiert. Eine Antwort zu geben, ist mir jetzt freilich noch unmöglich. Immerhin läßt sich auf Grund der Versuchsergebnisse bezüglich der Deutung des Elektrodiagramms von Frosch und Schildkröte folgendes sagen:

1. Bei Differentialableitung von der vorderen und hinteren Ventrikelfläche erhält man an der Basis einen doppelphasischen Aktionsstrom als Ausdruck einer Erregung, die in der Richtung von der Basis nach der Spitze zu verläuft.

2. In der Ventrikelmitte tritt sowohl bei Ableitung von der dorsalen wie ventralen Seite eine kleine nach oben gehende Zacke auf, an die sich unmittelbar ein viel größerer gleichgerichteter monophasischer Aktionsstrom anschließt. Die Form des Aktionsstroms würde auf eine anfangs überwiegende Negativität des der Basis näher liegenden Ableitungspunktes hindeuten.

3. An der Spitze erhält man einen diphasischen Aktionsstrom als Ausdruck einer Erregung, die in der Richtung von der Spitze nach der Basis zu verläuft.

4. Eine zeitliche Differenz in dem Eintritt der Schwankungen läßt sich in den einzelnen Differentialelektrogrammen kaum feststellen, wohl aber geringe Differenzen zwischen dem Auftreten der Schwankungen in Hauptelektrogramm und Differentialelektrogrammen.

Nicht unerwähnt möchte ich einige Versuche lassen, die sich mit der Untersuchung des Beginns der Aktionsströme an verschiedenen Herzstellen bei niedriger Temperatur beschäftigen. Die meisten Versuche in dieser Richtung ergaben aber kein sicheres Resultat, da bei Abkühlung die Schlagfrequenz und auch die einzelne Kontraktion des Herzens außerordentlich träge wird. Gleichzeitig werden auch die Aktionsströme sehr schwach, und man muß, um überhaupt meßbare Ausschläge zu bekommen, die Saiten sehr stark entspannen. Diese Notwendigkeit bringt dann wieder den Nachteil mit sich, daß die Saiten nur sehr träge reagieren. Infolgedessen erfolgt die Abhebung so allmählich, daß man nicht weiß, wohin man in der Kurve den Beginn der Saitenbewegung verlegen soll. Ich verfüge nur über eine Kurve, die mit einiger Sicherheit einen Schluß auf eine Zeitdifferenz zuläßt. Die Ösophagustemperatur des Frosches betrug 4°C und das Differentialelektrogramm der Basis begann etwa 13 σ früher als das der Spitze. Dieser Befund würde also darauf hindeuten, daß in diesem Falle bei der niedrigen Temperatur die Erregung an der Basis etwas eher auftrat als an der Spitze. Im übrigen verzichte ich natürlich darauf, dieses einzelne Versuchsergebnis in irgendeiner Richtung zu deuten.

Der unter 4. erwähnte Punkt, das nahezu gleichzeitige Auftreten der Erregung an verschiedenen Punkten der Herzoberfläche, steht nun im Widerspruch zu Schlüssen, die man aus früheren Versuchen gezogen hat. So legten Waller und Reid [1]) lange Schreibhebel über verschiedene Stellen des Herzens und nahmen auf Grund der zeitlich verschiedenen mechanischen Effekte an, daß die Erregung sich mit einer gewissen Geschwindigkeit fortpflanzt. Auf das Bedenkliche dieser Methode, den mechanischen Effekt ohne ein eigentliches Punctum fixum zu verzeichnen, hat schon Nicolai [2]) hingewiesen. Langendorff [3]) und

1) Waller und Reid (1888), On the action of the excised mammalian heart. Philos. transaction Roy. Soc. London. Vol. 180.

2) Nicolai, Die Mechanik des Kreislaufs in Nagels Handbuch der Physiologie 1909.

3) Langendorff, Eine neue Methode zur Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung im Herzmuskel. Sitzungsbericht der Naturforsch.-Ges. zu Rostock 1901.

Schlüter[1]) haben später am Säugetierherzen, zwei Nervmuskelpräparate, deren Nerven sie an verschiedenen Stellen anlegten, zur Registrierung des elektrischen Effektes benutzt und die zeitliche Differenz der sekundären Zuckungen bestimmt. Abgesehen von Faktoren, wie verschiedene Latenzzeiten der zwei Muskeln und der zwei Schreibhebel, die als Fehlerquellen in Betracht kommen können, war natürlich das Einbrechen von Stromschleifen von entfernten Punkten in die Nerven dadurch begünstigt, daß diese, um überhaupt erregt werden zu können, dem Herzen eine gewisse Strecke lang anliegen mußten. In jüngster Zeit sind für die Auffassung des Erregungsablaufs im Herzen und für die Deutung des Elektrokardiogramms vor allem die Anregungen entscheidend gewesen, die Gotch[2]) gab, indem er nachdrücklich auf die Entwicklungsgeschichte des Herzens verwies und als onto- und phylogenetisch bedingte Elementarform des Erregungsablaufs die peristaltische Welle ansprach. Diese Auffassung die übrigens auch Nicolai[3]) bereits 1907 speziell für das Säugetierherz entwickelte, ist zuletzt von Nicolai genauer in Nagels Handbuch und der Monographie: »Das Elektrokardiogramm des gesunden und kranken Menschen von Kraus und Nicolai«[4]) formuliert worden. Dort werden auch näher die Tatsachen erörtert, welche man aus Entwicklungsgeschichte, Anatomie und Pathologie zur Unterstützung der dargetanen Auffassung heranziehen kann. Gegen eine solche Auffassung sprechen nun die Ergebnisse der mitgeteilten Versuche. Gerade der Befund, daß am spontan schlagenden Froschherzen die Erregung praktisch gleichzeitig an verschiedenen Punkten der Oberfläche auftritt, gab nun Veranlassung zu der weiteren Untersuchung, ob eine derartige

1) Schlüter, Die Reizleitung im Säugetierherzen. Pflüg. Arch. 1902, Bd. 89.

2) Gotch, Capillary Electrometer Records of the Electrical Changes during the natural Beat of the Frogs Heart. Preliminary Comm. Proc. Roy. Soc. 1907, Vol. 79.

3) Vgl. auch Nicolai, Ablauf der Erregungsleitung im Säugetierherzen. Zentralbl. f. Physiol. 1907, Bd. 21 Nr. 20.

4) Kraus und Nicolai, Das Elektrokardiogramm des gesunden und kranken Menschen. Leipzig 1910.

Gleichzeitigkeit im Auftreten der Erregung auch bei künstlicher Reizung sich zeigen würde. Auf Grund der älteren Versuche von Marchand[1]) und Engelmann[2]) stand zu erwarten, daß hier eine beträchtliche Leitungszeit auftreten würde, und so bildet dieser Versuch zugleich den besten Prüfstein, ob die von mir angewandte Methode einwandfrei ist. Ich teile hier eine Kurve mit, die auf folgende Weise erhalten wurde. Einem spontan schlagenden Herzen von Rana esculenta waren an der Basis und auf der Vorderseite des Ventrikels nahe der Spitze Differentialelektroden aufgesetzt. Zur Reizung dienten Induktionsschläge, die durch Schließen und Öffnen eines konstanten primären Stromes erzeugt wurden. Die Induktionsschläge wurden durch Platinelektroden appliziert, die ca. 2 mm voneinander entfernt und unter die Herzspitze geschoben waren. Kurve 17, Tafel VII (14. 11. X. 1911), zeigt oben das Differentialelektrogramm der Basismitte, unten das der Spitze bei künstlicher Reizung. Die Temperatur der umgebenden Luft betrug 19,5° C, der Rollenabstand 7,5 cm. In die primäre Spule war ein Eisenkern geschoben. Die Kurve stammt von demselben Frosch wie die Kurven 4, 7 und 9. In beiden Differentialelektrogrammen der Kurve machen sich die Induktionsschläge durch Stromschleifen bemerkbar, in dem der Basis, entsprechend der größeren Entfernung von den Reizelektroden, schwächer als in dem der Spitze. Die nach unten gehenden kleinen Zacken *S* entsprechen je einem Schließungs-, die nach oben gehenden großen Zacken *Ö* je einem Öffnungsinduktionsschlag. Die Verschiedenheit ihrer Stärke und Richtung kommt auch in Größe und Richtung der Zacken sehr gut zum Ausdruck. Da Platinelektroden zur Reizung verwandt wurden, so erklären sich die oben und unten auftretenden, trägeren, zweiten, entgegengesetzten Phasen ohne weiteres als Polarisationsströme.

1) Marchand, Beiträge zur Kenntnis der Reizwelle und Kontraktionswelle des Herzmuskels. Pflüg. Arch. 1877, Bd. 15 S. 511. — Derselbe, Der Verlauf der Reizwelle des Ventrikels bei Erregung derselben vom Vorhof aus, und die Bahn, auf der die Erregung zum Ventrikel gelangt. Ebenda 1878, Bd. 17 S. 137.

2) Engelmann, Über das Verhalten des tätigen Herzens. Pflüg. Arch. 1878, Bd. 17 S. 68.

Sehr charakteristisch ist nun aber im Vergleich mit den früher gewonnenen Bildern bei doppelter Differentialableitung am spontan schlagenden Herzen die Tatsache, daß nach dem wirksamen Öffnungsinduktionsschlag unter der näher liegenden Differentialelektrode (unten) der (*R* entsprechende) Aktionsstrom erheblich früher auftritt als unter der weiter entfernten Differentialelktrode (oben) und daß *T* oben und unten ebenfalls eine beträchtliche zeitliche Differenz aufweist. Bemerkenswert erscheint auch noch, daß an der weiter entfernten Stelle die Aktionsströme schwächer sind als in der Nähe der Reizstelle. Eine Messung der Kurve ergab für die Distanz zwischen den beiden Differentialelektroden während der Diastole 10,2 mm. Die zeitliche Differenz beträgt für die *R* entsprechenden Aktionsströme ca. 32 σ. Für die *T*-Zacken ist wegen der trägen Saitenbewegung eine genaue Messung der Zeitdifferenz weniger gut möglich. Ich würde sie im vorliegenden Fall auf ca. 55 σ einschätzen. Würde man versuchen, aus der Zeitdifferenz und der Zwischenstrecke für die *R*-Zacke dann eine Leitungsgeschwindigkeit auszurechnen, so erhielte man unter der Annahme, daß die Erregung sich geradlinig von der Reizstelle aus fortgepflanzt hätte, eine Leitungsgeschwindigkeit von ca. 32 cm pro Sek. bei künstlicher Reizung. Nach den Versuchsergebnissen von Marchand und Engelmann durfte man eigentlich einen diphasischen Aktionsstrom erwarten. Nun ist dieser aber in der oberen Saitenkurve rein monophasisch, in der unteren schließt sich allerdings an den nach unten gerichteten nahezu monophasischen Strom noch eine ganz kleine zweite nach oben gerichtete Phase an. Trotzdem glaube ich, daß man es hier ebenso wie in der oberen Saitenkurve mit einem monophasischen Strom zu tun hat und daß man berechtigt ist, das Bild der unteren Kurve nach dem der oberen zu ergänzen. An den Polarisationsstrom schließt sich oben noch eine ganz kleine, flache Erhebung der Saite an, über deren Herkunft ich mir keine Rechenschaft zu geben vermag. Vergleicht man hiermit jetzt die untere Saitenkurve, so sieht man

ohne weiteres, daß die langsam verlaufende zweite Phase, die durch den Polarisationsstrom bedingt ist, durch den steil einsetzenden Aktionsstrom unterbrochen wird, und ich möchte die kleine »zweite Phase« des Aktionsstromes unten auf eine analoge Saitenbewegung beziehen, die nur hier unten durch den Aktionsstrom zum größten Teil verdeckt wird. Wenn diese Überlegung hier zutrifft, dann ist auch der unten auf die Reizung unmittelbar folgende Aktionsstrom als monophasisch anzusehen. Diesen Befund kann ich nicht sicher erklären. Vielleicht ist an eine Möglichkeit zu denken, die auch für die Gestaltung von mehreren, unten zu erwähnenden Modellversuchen (s. S. 137—141) maßgebend war. Man kann sich vorstellen, daß eine Faser ziemlich geradlinig von der Reizstelle nach der ersten Ableitungsstelle verläuft, während eine andere im Bogen an dieselbe Stelle gelangt. Wenn dann die Erregung der ersten Faser an dem ersten Ableitungspunkt abgeklungen ist und am zweiten auftritt, verfällt entsprechend der längeren Leitungsstrecke der Punkt der zweiten Faser in Erregung, der unter der ersten Ableitungselektrode liegt. Die zweite Phase des Aktionsstromes der ersten Faser wird dann kompensiert, weil beide Ableitungspunkte sich negativ verhalten. Voraussetzung für diese Überlegung ist allerdings noch weiter, daß die zweite Faser gar nicht mehr mit der zweiten Ableitungselektrode in direkte Beziehung tritt, sondern schon auf der interpolaren Strecke abbiegt. Jedenfalls entspricht die Form der Kurven bei künstlicher Reizung im übrigen ganz den gewöhnlichen Erwartungen. Es war an der Spitze gereizt worden, und die zuerst auftretende Senkung der Saite bedeutet ja eine früher auftretende Negativität des der Spitze, also dem Reizort, näher liegenden Ableitungspunktes. Die Versuche mit künstlicher Reizung bei doppelter Differentialableitung bestätigen also, daß im Gegensatz zum spontan schlagenden Herzen die Erregung nicht nahezu gleichzeitig sich allen Punkten mitteilt, sondern, wie ja schon die Versuche von Marchand und Engelmann, allerdings nicht am bluterfüllten, noch normal schlagenden Herzen, zeigten, sich von der Reizstelle aus nach allen Richtungen mit einer gewissen Geschwindigkeit fortpflanzt. Im übrigen ist gerade der Charakter der künstlich erzeugten

ventrikulären Extrasystole Gegenstand größerer Untersuchungen von H. E. Hering[1]) und Kraus und Nicolai gewesen.

Zusatz von S. Garten.

»Dieser Folgerung aus der Beobachtung der Herztätigkeit mittels zweier Differentialelektroden, daß der ganze Ventrikel, wenigstens was seine äußere Muskulatur anlangt, praktisch gleichzeitig erregt wird, stehen gewisse theoretische Bedenken entgegen. Es erscheint zwar äußerst zweckmäßig, daß die Spannungszunahme an allen Muskelelementen der Oberfläche nahezu gleichzeitig einsetzen wird — aber wie erklären wir dann überhaupt das Zustandekommen der Aktionsströme? Ist gleichzeitig jede Muskelfaser erregt, so kann der Ventrikel nach außen keinen ableitbaren Strom liefern und ebenso, wenn der Erregungsablauf überall in gleicher Weise beginnt und endet. Hier käme nun die Vorstellung zu Hilfe, die man sich durch das Reizleitungssystem schaffen kann, daß jeder Reizleitungsfaser ein peripherer Muskelbezirk entspräche, der zwar protoplasmatisch mit dem Nachbarbezirk noch zusammenhänge, aber doch mit dem Nachbarstück nur eine lockere Verbindung besäße, so daß die einzelnen Bezirke bei ihrer elektromotorischen Wirksamkeit sich wie eine Reihe kurzer hintereinander geschalteter Muskeln verhielten. Jede plötzliche Änderung des Querschnitts eines Muskels bedingt ja, wie unten näher ausgeführt wird, eine Änderung der gewöhnlichen Stromkurve. Die elektromotorische Wirksamkeit des Systems bei einer einmaligen Erregung wird dann etwa solange dauern, als die Erregung Zeit braucht, um von einem Ende des Bezirkes bis zum anderen Ende zu gelangen[2]).«

1) H. E. Hering, Nachweis der Automatie der mit den Vorhöfen oder Vorhofsresten in Verbindung stehenden Kammern bzw. Verbindungsfasern des Säugetierherzens durch Auslösung ventrikulärer Extrasystolen. Pflüg. Arch. 1905, Bd. 107 S. 108.

2) Anmerkung: Zugleich möchte ich bei dieser Gelegenheit darauf hinweisen, daß in meiner Arbeit: »Die Produktion von Elektrizität im Handbuch der vergleichenden Physiologie von Winterstein 1910« der letzte Satz auf S. 122 vor dem zweiten Absatz einen Irrtum enthält. Derselbe lautet: »Diese Erklärung« (d. h. die von Einthoven gegebene), »die sich auf Beobachtung zahlreicher pathologischer Fälle wie auch auf das Tierexperiment gründet, stimmt in der Hauptsache mit dem Deutungsver-

Es sind nun noch einige Worte über die *T*-Zacke zu sagen. Man hat schon lange beobachtet, daß *T* im Elektrokardiogramm zu den variabelsten Bestandteilen gehört. Größe und Richtung sind von den verschiedensten Faktoren abhängig. (Vergl. hierzu die Arbeiten von Einthoven, H. E. Hering, R. H. Kahn, Samojloff, Straub u. a.). Aber man findet, abgesehen von äußeren Einflüssen, wie Temperaturerniedrigung, Chloroformnarkose, Blutentziehung, Vagusreizung, Schädigung infolge längerer Freilegung etc., auch bei völlig normalen Herzen negative *T*-Zacken, wie das z. B. von Einthoven [1]) für Hunde mitgeteilt wird. Vor allem sind die *T*-Zacken auch, wie die von Henle [2]) im Gießener Institut angestellten Versuche beweisen, sehr leicht und gesetzmäßig durch Polarisation mittels konstanten Stromes zu beeinflussen. Henle kam damals zu dem Schluß: »daß auch bei der normalen Kontraktion zur Zeit der *T*-Zacke nicht nur an der Herzbasis, sondern auch nahe der Herzspitze ein Strukturelement sich noch mehr oder weniger in Erregung befindet.« Gotch [3]) hat bekanntlich zuerst aus entwicklungs-

such überein, den bereits ein Jahr zuvor Nicolai unternommen hatte.« In Wirklichkeit hat bereits vor Nicolai (1907) Einthoven (1906) (Le Télécardiogramme, Arch. internationale de Physiologie Vol. 4, Fsc. II 1906, p. 135) ausdrücklich bemerkt, daß der Gipfel *P* allein dem Erregungsvorgang der Vorhöfe entspricht, dagegen *Q*, *R*, *S*, *T* dem Erregungsvorgang der Ventrikel. Auch der Ausdruck »stimmt in der Hauptsache mit dem Deutungsversuch überein« ist in obigem Satze schlecht gewählt, da in der Deutung der Zacken, die auf den Erregungsvorgang im Ventrikel zu beziehen sind, bei Einthoven und Nicolai Unterschiede bestehen, wie ja auch aus meiner eigenen Darstellung in der »Produktion von Elektrizität« hervorgeht, vgl. z. B. auch Nicolai (Zentralbl. f. Physiol. 1907, S. 679) und Einthoven (Pflüg. Arch. 1908, Bd. 122 S. 576). Ich bin Herrn Kollegen Einthoven dankbar, daß er mich gelegentlich auf diesen Irrtum hinwies, so daß es mir möglich war, ihn hier selbst zu berichtigen.

1) W. Einthoven, Weiteres über das Elektrokardiogramm. Pflüg. Arch. 1908, S. 531 u. 532.

2) Henle, Über die Beeinflussung des Elektrokardiogramms durch die polare Wirkung des konstanten Stromes. Zeitschr. f. Biol., Bd. 55 S. 295.

3) Gotch, Capillary Electrometer Records of the Electrical Changes during the natural Beat of the Frogs Heart. Preliminary comm. Proc. Roy. Soc., Vol. 79.

geschichtlichen Gründen, die ihm seine Versuche am Froschherzen zu bestätigen schienen, sich dahin ausgesprochen, daß die Erregung von dem venösen Teil des Ventrikels nach der Spitze verlaufe, dort umkehre und entsprechend der Herzschlauchkrümmung nach den arteriellen Ostien aufsteige. Nach dieser Anschauung ist also die *R*-Zacke als Ausdruck einer Erregung aufzufassen, die von dem venösen Teil der Basis nach der Spitze verläuft, wobei eine totale oder partielle Kompensation der Gegenphase eintritt, und die *T*-Zacke als Ausdruck einer Erregung, die von der Spitze wieder nach den arteriellen Ostien aufsteigt. Die Nicolaische Deutung des Erregungsablaufs für das Säugetierherz stimmt in der Hauptsache mit der von Gotch aufgestellten überein, vor allem in bezug auf die *T*-Zacke. Einthoven[1]) vertritt bezüglich der *T*-Zacke folgende Ansicht: »Hört dieser Kontraktionszustand (gemeint ist wohl Erregungszustand) auch in der ganzen Muskelmasse im selben Moment auf, so bildet sich keine Spitze *T*, wie bei Degeneration und Insuffizienz des Herzens vorkommt«. Er bringt also die Entstehung der *T*-Zacke mit der verschieden langen Dauer der Erregung oder des Kontraktionszustandes in Verbindung. Jener Auffassung, daß *T* durch das Aufsteigen der Erregung nach der Basis bedingt sei, widersprechen nun die Ergebnisse meiner Versuche. Denn da die *T*-Schwankung an der ganzen Herzoberfläche bei Differentialableitung bald positiv, bald negativ auftritt, können wir in derselben unmöglich einen lokalen Erregungsprozeß an der Herzbasis, speziell der Gegend der arteriellen Ostien, erblicken. Den Einwand, daß die *T*-Zacken der Spitzendifferentialelektrogramme etwa durch Stromschleifen von der Basis aus bedingt seien, widerlegt das beigegebene Vorhofsdifferentialelektrogramm Kurve 14 Taf. VI, in dem sich Stromschleifen von der Basis aus viel eher hätten bemerkbar machen müssen, da die Differentialelektrode in diesem Fall der Basis doch viel näher lag, und hier ist ja nicht einmal die große *R*-Zacke auch nur angedeutet. Einen weiteren Beweis gegen die Auffassung der *T*-Zacke von Gotch und

[1]) Einthoven, Weiteres über das Elektrokardiogramm. Pflüg. Arch. 1908, S. 577.

Nicolai erbringen auch die Differentialelektrogramme, die bei künstlicher Reizung an der Basis und ganz in der Nähe der Spitze erhalten wurden. In beiden Saitenkurven tritt eine *T*-Zacke auf, und zwar in der Nähe der Spitze erheblich früher als an der Basis. Wenn *T* lediglich auf einen lokalen Prozeß an der Herzbasis zu beziehen wäre, so könnte sich doch nicht schon erheblich früher eine *T*-Zacke an der Herzspitze zeigen. Die Möglichkeit, daß es sich hier um Stromschleifen von der Basis aus handle, ist von vornherein ausgeschlossen, weil ja, wie schon gesagt, dort der analoge Prozeß erst erheblich später auftritt. Allerdings mache ich hier die wohl berechtigte Voraussetzung, daß die Schwankungen, die ich hier als *T*-Zacken anspreche, mit den *T*-Zacken des Normalelektrogramms identisch sind. Noch auf einen Punkt möchte ich hier verweisen, der ebenfalls als Argument gegen Gotchs Auffassung geeignet erscheint. Bei der von mir benutzten Orientierung der Differentialelektroden (eine Negativität eines nach der Spitze zu gelegenen Punktes entsprach einer Senkung der Saite) hätte *T*, wenn die Auffassung von Gotch richtig wäre, nach unten gehen müssen, was aber, wie Kurve 14 zeigt, nicht der Fall ist. Übrigens sind schon seit längerer Zeit andere Stimmen gegen jene Ansicht laut geworden. (H. E. Hering[1]), Samojloff[2]), Straub[3]), R. H. Kahn[4]), Einthoven[5]).) Ich selbst muß die Frage nach der Bedeutung der *R*- und der *T*-Zacke überhaupt offen lassen, da mir eine einwandfreie Erklärung auf Grund der bis jetzt bekannten Tatsachen nicht möglich erscheint. Nur soll als tatsächlich wichtig nochmals hervorgehoben werden, daß der Prozeß, der der *T*-Zacke

---

1) H. E. Hering, Experimentelle Studien an Säugetieren über das Elektrokardiogramm. Zweite Mitteilung. Zeitschr. f. exper. Pathol. u. Therap. 1909, Bd. 7 S. 14.

2) A. Samojloff, Weitere Beiträge zur Elektrophysiologie des Herzens. Pflüg. Arch. 1910, Bd. 135 S. 445.

3) H. Straub, Zeitschr. f. Biol., Bd. 53 S. 499.

4) R. H. Kahn, Weitere Beiträge zur Kenntnis des Elektrokardiogramms. Pflüg. Arch. 1909, Bd. 129 S. 320.

5) W. Einthoven, Weiteres über das Elektrokardiogramm. Pflüg. Arch. 1908, S. 577.

zugrunde liegt, sich nach den Versuchen mit der Differentialelektrode an jedem Teil des Herzmuskels abspielt, soweit eben überhaupt eine *T*-Zacke auftritt, und im Fall der künstlichen Reizung, was besonders bemerkenswert erscheint, entsprechend der verschiedenen Leitungszeit an vom Reizort verschieden weit entfernten Stellen zu verschiedenen Zeiten nach der Reizung auftritt.

Bei Versuchen am Säugetierherzen (bei Hund und Kaninchen) ergeben sich für die Differentialableitung weit größere technische Schwierigkeiten als beim Kaltblüter. Schon die mit der Freilegung des Herzens verbundenen Umstände (Narkose, Tracheotomie, künstliche Atmung, Eröffnung des Thorax, Abkühlung des Herzens während der Operation und Versuchsdauer) stellen unliebsame Zugaben dar. Vor allem vereitelt aber die hohe Schlagfrequenz und die ausgiebige räumliche Verschiebung des Herzens bei jedem einzelnen Herzschlag leicht eine zweckmäßige, einwandfreie Anbringung der Differentialelektroden. Daraus erklärt sich die geringe Anzahl von guten Kurven, die ich bei Säugetieren bis jetzt erhalten habe. Sie zeigten, daß bezüglich der Form der an den einzelnen Stellen der Herzoberfläche beim Säugetier ableitbaren Stromkurven jedenfalls kompliziertere Verhältnisse bestehen als beim Kaltblüter. So wiesen die Differentialelektrogramme von verschiedenen Herzstellen nicht jene Regelmäßigkeit der Richtung und der Art des Verlaufes auf, wie sie sich für jene von Frosch und Schildkröte ergeben hatte. Man beobachtet an einer Stelle bald zwei-, bald drei- oder vierphasische Schwankungen zur Zeit der *R*-Zacke im Hauptelektrogramm, bald ist die erste Phase positiv, bald negativ. Möglicherweise ist aber diese Unregelmäßigkeit in den Befunden darauf zurückzuführen, daß bei den einzelnen Aufnahmen nicht immer von genau derselben Stelle abgeleitet wurde. Vielleicht ergeben Versuche, die über den Gegenstand im hiesigen Institut angestellt werden sollen, auch eine völlige Gesetzmäßigkeit der Erscheinungen. Das Haupt-

augenmerk ist dabei, wie schon erwähnt, darauf zu richten, daß man stets die Ableitung von einer bestimmten Stelle vornimmt, was sich vielleicht durch Annähen des Baumwollfadens an das Epicard erreichen läßt.

Die *T*-Zacke ist in den Differentialelektrogrammen von Hund und Kaninchen meistens nur klein, manchmal nur gerade noch angedeutet. Sie findet sich aber wie bei Frosch und Schildkröte an allen Teilen der Herzoberfläche. Wenn meine bisherigen Beobachtungen einen einheitlichen Befund bezüglich der Form der verschiedenen Differentialelektrogramme am Säugetierherzen nicht ergaben, so zeigten sie doch eine völlige Übereinstimmung mit jenem Befund bei Frosch und Schildkröte, daß die Aktionsströme an den verschiedenen Stellen der Herzoberfläche bei spontanem Herzschlag fast mathematisch gleichzeitig beginnen. Die Geschwindigkeit der Schreibfläche betrug, wie in Fig. 20 (8. 18. XII. 11) S. 156 die Zeitmarken des Jaquetschen Chronographen von $^1/_5$ Sek. und der Zungenpfeife von $^1/_{148}$ Sek. zeigen, ca. 28 cm pro Sek., so daß sich noch Zeitdifferenzen von 1 σ gut erkennen lassen. Bei dieser Aufnahme (sie stammt von einem Hund) ist trotz der relativ hohen Geschwindigkeit der Schreibfläche keine Differenz in dem Eintritt der Schwankungen an der Basis und an der Herzspitze festzustellen. Die obere Saite war mit einer Differentialelektrode verbunden, die an der Wurzel der A. pulmonalis lag, die untere Saite mit einer solchen an der Herzspitze. Die Elektrodendistanz betrug 5,5 cm.

Bei künstlicher Reizung des Herzens beim Hund mit einzelnen Induktionsschlägen trat eine ähnliche Differenz in dem Eintritt der Aktionsströme zu Tage wie bei den Versuchen am Froschherzen. So gibt z. B. Fig. 21 (14. 18. XII. 11) S. 156 unten das Differentialelektrogramm der Herzspitze, oben das einer Stelle des linken Herzrandes an der Basis unterhalb des linken Herzohres beim Hunde wieder. Die Reizelektroden aus Platin lagen direkt an der Herzspitze. In beiden Elektrogrammen machen sich wieder wie in Kurve 17 Taf. VII die Induktionsschläge als kleine steile Zacken bemerklich. Auf den jeweils wirksamen Öffnungs-

induktionsschlag ($\ddot{O}$) folgt in dem unteren Elektrogramm eine Schwankung, deren kleine, erste Phase nach unten und deren große, zweite Phase nach oben geht, entsprechend einer Erregung, die von der Spitze nach der Basis zu verläuft, wie es auch entsprechend der Reizstelle zu erwarten war. Eine Erklärung für die übrigen noch in der Kurve sichtbaren Zacken vermag ich nicht zu geben. In dem oberen Elektrogramm setzt der auf den wirksamen Öffnungsinduktionsschlag ($\ddot{O}$) folgende Aktionsstrom zirka $19\,\sigma$ später ein als unten. Er ist zweiphasisch, die erste Phase geht, entsprechend der von der Spitze her kommenden Erregung nach unten. Dem eigentlichen Aktionsstrom geht allerdings noch eine nach oben gerichtete, kaum sichtbare Vorschwankung voraus, die aber wohl mit Recht auf eine Stromschleife von einem kurz vorher erregten Nachbarpunkte bezogen werden kann. Außerdem sind wie in Kurve 17 die Ausschläge oben, entsprechend der größeren Entfernung der Ableitungsstelle vom Reizort, schwächer als unten.

Von T-Zacken ist in dieser Kurve nichts zu sehen oder, besser gesagt, man weiß nicht recht, was man dafür ansehen soll. Andere Kurven geben zwar ähnliche Bilder wie Kurve 17, doch erscheinen diese Befunde zu unsicher, um in dem Sinne wie bei Kurve 17 gedeutet zu werden. Abgesehen von diesem Punkt besteht aber auch bezüglich der Differentialelektrogramme eine weitgehende Analogie mit jenen Befunden am Froschherzen (bei spontanem Schlag gleichzeitiger Beginn der Aktionsströme an verschiedenen Punkten, bei künstlicher Reizung ungleichzeitiger Beginn). Die Anschauung, daß die Erregung bei spontanem Herzschlag sich dem ganzen Ventrikel gleichzeitig mitteilt, hat übrigens Einthoven[1]) bereits früher auf Grund des vorliegenden anatomischen Materials und seiner eigenen Versuchsergebnisse ausgesprochen.

Im Anschluß an die Elektrokardiogrammstudien habe ich dann noch Modellversuche über die Möglich-

1) W. Einthoven, Weiteres über das Elektrokardiogramm. Pflüg. Arch. 1908, S. 576 u. 577.

keiten des Zustandekommens monophasischer Aktionsströme am kuraresierten, unverletzten Sartorius des Frosches angestellt, um eventuell einige Anhaltspunkte für das Zustandekommen der monophasischen Ströme, wie man sie vom Herzen her kennt, zu gewinnen. Man muß bei diesen Experimenten von irgendeiner Vorstellung ausgehen, nach der man den Versuch im einzelnen gestaltet. Es ist klar, daß die Möglichkeiten nicht so leicht zu erschöpfen sind, und daß nicht gerade jede beim Herzen verwirklicht zu sein braucht. Ohne eine ganz genaue Kenntnis des Verlaufs der

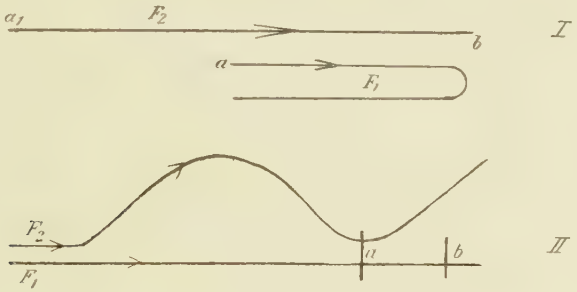


Fig. 6.

Fasern im Herzen, in denen die Reizleitung erfolgt, ist man natürlich bei der Gestaltung der Modellversuche auf die Phantasie angewiesen, weil eben eine direkte Vorlage fehlt. Die hier mitgeteilten Kombinationen verdanke ich alle Herrn Prof. Dr. Garten. Sie sind von folgenden verschiedenen Gesichtspunkten aus aufgestellt:

1. Man kann sich denken, daß eine Faser an einem Punkte scharf umbiegt und wieder in die Nähe der Ausgangsstelle zurückkehrt, während eine andere Faser in ihrer eigenen Mitte den Anfangspunkt der ersten Faser berührt und parallel zu ihr weiter verläuft. Die Skizze (Fig. 6 I) erläutert die Verhältnisse näher. Tritt dann die Erregung in a und in a_1 gleichzeitig auf und verläuft sie in gleicher Richtung, so erhält man bei Ableitung von a und b einen monophasischen Strom, da sich die zweite Phase von F_1, entsprechend dem Erregungsvorgang bei b, und

die erste Phase von F_2, entsprechend dem Erregungsvorgang bei a, ferner die dritte Phase von F_1 und die zweite Phase von F_2 gegenseitig mehr oder weniger vollkommen in dem abgeleiteten Kreise aufheben werden. Infolgedessen kommt nur die erste Phase von F_1, entsprechend dem Erregungsvorgang bei a, zur vollen Entwicklung. Eine andere Möglichkeit bestände, wie schon erwähnt, darin, daß eine Faser F_2 (Fig. 6 II), die zunächst neben einer anderen Faser F_1 läuft, im Bogen abbiegt und erst später wieder einmal die geradlinig verlaufende Faser F_1 tangiert.

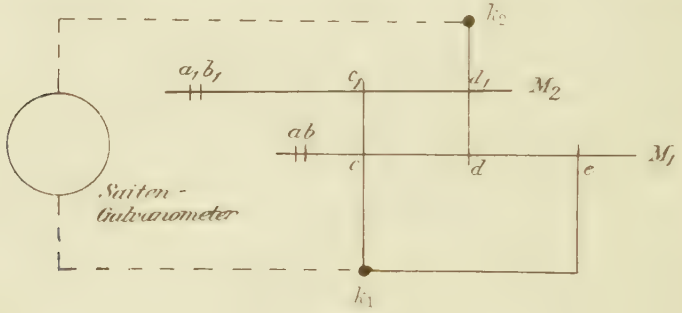


Fig. 7.

Leitet man dann von a und b ab, so wird eine Erregung in der Faser F_1 früher in a eintreffen als in der Faser F_2. Bei einer entsprechenden Länge der von der Erregung zu durchlaufenden Strecken kommt es dann ebenfalls zu einer Phasenverschiebung, deren Resultat eine mehr oder weniger vollständige Kompensation der zweiten Phase von F_1, entsprechend der Erregung von F_1 bei b, ist. Das Prinzip einer derartigen Kombination ist an sich ja sehr einfach. Man benutzt zwei Sartorii und leitet von dem ersten einen dreiphasischen, von dem anderen einen zweiphasischen Strom ab und macht, wie Fig. 7 zeigt, $b_1 c_1 = b d$ und $c_1 d_1 = d c$. Dann werden sich die verschiedenen Phasen in der geschilderten Weise gegenseitig aufheben, vorausgesetzt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung in beiden Muskeln gleich und die verschiedenen Phasen einander symmetrisch sind. Es würde dann mit dem Eintreffen der Erregung bei c die erste Phase von M_1 beginnen. Gelangt die Erregung nun weiter

nach d, so müßte sich jetzt die zweite Phase von M_1 entwickeln. Gleichzeitig ist aber in M_2 auch der Punkt c_1, der ja gleichweit wie d vom Reizort entfernt ist, in Erregung geraten, und da die Ableitung nach dem Galvanometer so von zwei erregten Punkten erfolgt, müssen sich die elektromotorischen Kräfte in dem Ableitungskreis kompensieren. Schreitet dann die Erregung nach e fort, so trifft sie wieder gleichzeitig in d_1 ein, und nun wiederholt sich derselbe Vorgang wie vorher. Danach müßte sich wegen der Kompensation der anderen Phasen nur die erste Phase von M_1, entsprechend der Erregung bei c, entwickeln können. Der Verwirklichung des Prinzips stellen sich indessen recht erhebliche Schwierigkeiten entgegen. Man muß, um direkte Nebenschließung zu vermeiden, die Muskeln isoliert nebeneinander aufspannen und zwei Induktorien verwenden, deren primäre Spulen hintereinander geschaltet sind, und deren Strom in einem gegebenen Moment geöffnet wird. Den beiden Muskeln M_1 und M_2 wird der Öffnungsinduktionsschlag durch die Platinelektrodenpaare a, b und a_1, b_1 zugeführt. Die Schwierigkeiten, die sich beim Versuch selbst einstellen, ergeben sich ohne weiteres, sobald man sich die verschiedenen Ausgleichsmöglichkeiten der auftretenden Potentialdifferenzen überlegt. Ich will versuchen, hierüber eine kurze Übersicht zu geben. Die mit der Erregung der einzelnen Punkte auftretenden Potentialdifferenzen können sich dann durch folgende Kreise ausgleichen:

c negativ	d negativ	e negativ
I. Phase von M_1	II. Phase von M_1	III. Phase von M_1
1. $e\ k_1\ c$	1. $d_1\ c_1\ c\ d$	1. $c\ k_1\ e$
2. $d\ d_1\ c_1\ c$	2. $d_1\ k_2$ Saite $k_1 \begin{matrix} c \\ e \end{matrix} d$	2. $d\ d_1\ k_2$ Saite $k_1\ e$
3. $\begin{matrix} d \\ c_1 \end{matrix} d_1\ k_2$ Saite $k_1\ c$		3. $d\ d_1\ c_1\ c\ k_1\ e$

c_1 negativ	d_1 negativ
I. Phase von M_2	II. Phase von M_2
1. $d_1\ d\ c\ c_1$	1. $c_1\ c\ d\ d_1$
2. $d_1\ d\ e\ k_1\ c\ c_1$	2. $c_1\ c\ k_1\ e\ d\ d_1$
3. $d_1\ k_2$ Saite $k_1\ c\ c_1$	3. $c_1\ c\ k_1$ Saite $k_2\ d_1$

Man ersieht daraus, daß die zweite Phase von M_1 infolge des geringeren Widerstandes im Galvanometerkreis und des

Wegfalles einer zweiten Nebenschließung, welche die erste Phase noch hat, dieser gegenüber begünstigt wird, wie das auch sehr deutlich die punktierte Linie in Fig. 8 zeigt. Bei allen Phasen kommt natürlich noch der Nebenschluß im Bindegewebe der Muskeln selbst in Betracht. Aber auch abgesehen von diesen ungleichen Widerstandsverhältnissen ist es gar nicht so leicht, gerade für einen Versuch immer zwei Sartorii zu finden, die annähernd gleichstarke Ströme liefern. Störend kann ferner der Umstand

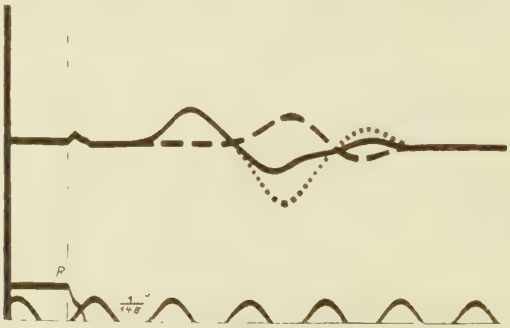


Fig. 8.

wirken, daß beide Muskeln nicht ganz gleich stark gespannt sind, was dann wieder zu einer nicht beabsichtigten Phasenverschiebung führen kann. Man wird daher begreifen, daß es mitunter recht schwierig ist, auch nur einigermaßen brauchbare Kurven zu bekommen. Obwohl ich die Sache sehr oft probiert habe, bin ich nie zu einem ganz befriedigenden Resultat gelangt. Immerhin sieht man, daß die in Fig. 8 ausgezogene Linie sich der Form eines monophasischen Stromes nähert, besonders wenn man sie mit der punktierten Linie, die den dreiphasischen Strom von M_1 wiedergibt, vergleicht. Die außerordentlich starke zweite Phase ist wenigstens partiell kompensiert. Der größeren Anschaulichkeit wegen habe ich die drei Originalkurven vergrößert übereinander projiziert und nachgezeichnet. Die vergrößerte Zeichnung wurde dann photographiert. Die gestrichelte Linie gibt den diphasischen Strom von M_2 wieder. Bei der Aufnahme dieser letzten Kurve war der Induktionsschlag des ersten Induktoriums durch Kurzschluß abgeblendet, so daß nur der Sartorius M_2 zuckte. Darauf wurde

dieser Kurzschluß geöffnet und das zweite Induktorium kurzgeschlossen, so daß jetzt nur der Sartorius M_1 gereizt wurde. Schließlich wurden beide Muskeln gereizt, und es resultierte eine Kurve, wie sie die ausgezogene Linie in Fig. 8 wiedergibt. Vergleicht man die Höhen der einzelnen Phasen miteinander, so ergibt sich in den Originalkurven für die erste Phase des dreiphasischen Stromes 6,25 mm, für die zweite Phase 9,1 mm, für die erste Phase der Kombinationskurve 6,25 mm, für die zweite Phase 3,4 mm, also eine beträchtliche Abschwächung der zweiten Phase des dreiphasischen Stromes.

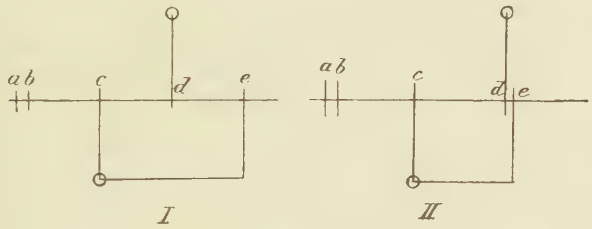


Fig. 9.

2. Eine zweite Möglichkeit, einen nahezu monophasischen Strom zu erhalten, war folgende: Leitet man von einem Sartorius an drei Stellen in etwa gleichen Abständen ab und verbindet die mittlere Elektrode mit der einen Klemme des Galvanometers, die beiden anderen Elektroden mit der zweiten Klemme, so erhält man bei Reizung einen dreiphasischen Strom. Rückt man dann die dritte Elektrode dicht an die zweite Elektrode heran, so wird sehr rasch nach der zweiten Phase die dritte einsetzen, es kommt zu einer Überlagerung der Phasen und, da sie einander entgegengesetzt sind, zu einer Subtraktion. Kurve 18, Tafel VIII (1. 6. IX. 11) gibt den dreiphasischen Strom eines Sartorius wieder, der bei *a -b* (vgl. Fig. 9 I) gereizt wurde. Die Ableitung nach dem Galvanometer erfolgte einerseits von *c* und *e*, anderseits von *d*. Kurve 19, Tafel VIII (2. 6. IX. 11) zeigt den Aktionsstrom desselben Muskels, nachdem die Elektrode *c* dicht an *d* herangerückt worden ist (vgl. Fig. 9 II). Genauere Angaben über die Versuchsbedingungen lasse ich hier folgen:

Tabelle II.

Temp. 21° C	1 Ordinate in σ	$a-b$	$b-c$	$c-d$	$d-e$	RA in cm	Eichung mit 20 MD ergab Ablenkung in mm	$h_1 : h_2$
		in mm						
Versuch 1								
6. IX. 11	0,71	2,5	7,4	7,8	6,8	8	20	1 : 0,910
Versuch 2								
6. IX. 11	0,71	2,5	7,4	7,8	1,8	8	—	1 : 0,344

In der letzten Kolonne ist das Verhältnis ($h_1 : h_2$) der Höhen der ersten und zweiten Phase angegeben. Auch hier sieht man eine starke Abschwächung der zweiten Phase.

3. Für eine dritte Reihe derartiger Modellversuche war folgende Vorstellung maßgebend: Man kann sich denken, daß eine

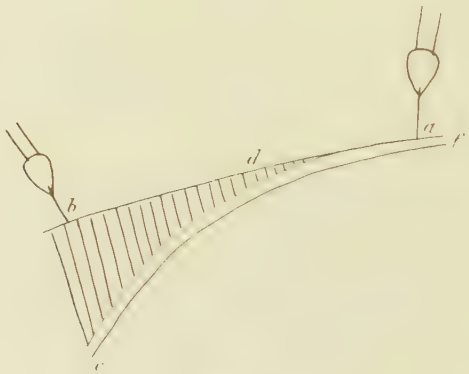


Fig. 10.

Faser *f* (Fig. 10), die dicht unter dem Epikard verläuft, umbiegt und in der Tiefe unter anderem Gewebe verschwindet. Die Erregung verlaufe in der Richtung $a > c$. Leitet man dann von *a* und *b* ab, so kann sich die erste Phase voll entwickeln, kommt aber die Erregung nach *d*, so dient das in Fig. 10 schraffiert gezeichnete Gewebe als indifferenter Ableiter nach der Elektrode *b*; zugleich bildet es aber einen guten Nebenschluß für elektromotorische Kräfte, die sich an *d* entwickeln, so daß in den Galvanometerkreis nur wenig Stromfäden einbrechen. Dadurch kommt eine Abschwächung oder vollständige Aufhebung der

zweiten Phase zustande. Die Ausführung der Versuche erfolgte auf verschiedene Weise.

Eine Anordnung, die dem Vorbild schon ziemlich nahe kommt, ist folgende (Fig. 11): Man spannt einen Sartorius in gewöhnlicher Weise auf und legt auf den Muskel einen Keil aus Fließpapierstückchen, die man mit Ringerscher Lösung tränkt. Die Ableitung zum Galvanometer erfolgt einmal mit einer gewöhnlichen Fadenelektrode c und zweitens von der oberen Kuppe d_1 des Fließpapierkeiles. Dann wirkt das Fließpapier als indifferenter

Fig. 11.

Ableiter, sobald die Erregung nach d kommt. Hier ist zunächst bei der dünnen Schicht des aufliegenden Fließpapiers die direkte Ableitung zu d_1 nur schwach. Schreitet die Erregung weiter, so finden die auftretenden Potentialdifferenzen beiderseits guten Nebenschluß in dem Fließpapier, und auf das Galvanometer wirken nur schwache Stromzweige ein. Kurve 20, Tafel VIII (2. 2. IX. 11) zeigt den diphasischen Aktionsstrom eines Sartorius bei Ableitung mittels zweier Fadenelektroden von c und von d, Kurve 21, Tafel VIII (1. 2. IX. 11) den Aktionsstrom desselben Muskels, nachdem in der geschilderten Weise der Fließpapierbausch auf den Muskel gelegt worden ist. Die Abschwächung der zweiten Phase ist sehr deutlich. Daß sie nicht etwa auf ein durch längeres Liegen des Muskels bedingtes Dekrement zu beziehen ist, geht daraus hervor, daß der deutlich diphasische Strom (Kurve 20) erst nach der Kurve 21 gewonnen wurde. Die flachen Wellen nach der zweiten Phase sind vielleicht auf abortive Muskelrhythmen zurückzuführen, wie man sie bei ganz frischen Muskeln bei starkem Reiz auch mit Induktionsschlägen erhält[1]). Einen

1) E. Th. v. Brücke, Über die Beziehungen zwischen Aktionsstrom und Zuckung des Muskels im Verlauf der Ermüdung. Pflüg. Arch. 1908, Bd. 124 S. 215.

Beweis a fortiori stellen die Kurven 22 und 23, Taf. VIII (3 und 4. 2. IX. 1911) dar, wo in Nr. 22 die Zwischenstrecke $c - d$ also bis zu dem Anfang des Fließpapierkeiles nur 1 mm, in Nr. 23 aber 9 mm betrug. Obwohl mit der Zunahme der Zwischenstrecke das Dekrement steigt, zeigt Kurve 23 einen ausgesprochen diphasischen Strom, Kurve 22 nur eine kleine zweite Phase. Daß hier die Abschwächung der zweiten Phase nicht auf das Heranrücken der zweiten Ableitungselektrode zurückzuführen ist, wie man auf den ersten Blick glauben konnte, geht am deutlichsten aus dem Differentialelektrogramm der Kurve 1, Taf. VIII hervor. Dort lagen ja die für die Ableitung in Betracht kommenden Punkte noch näher aneinander, und es kommt in einem solchen Fall beim Skelettmuskel einfach auch zu einer Abkürzung der ersten Phase, die gar nicht Zeit hat, sich bis zu voller Höhe zu entwickeln, weil die Erregung, kurz nachdem sie am ersten Ableitungspunkt angelangt ist, auch am zweiten schon Platz greift. Daraus resultieren allerdings kleinere Galvanometerausschläge, aber diphasisch bleibt die Stromkurve auf jeden Fall.

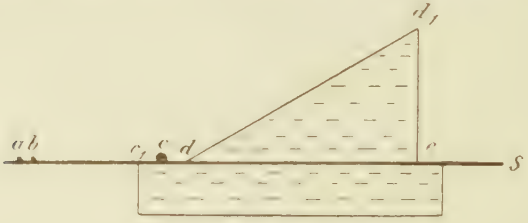


Fig. 12.

Dem ursprünglichen Vorbild noch näher kommt eine etwas andere Versuchsanordnung, bei der unter dem Muskel ein mit Ringerscher Lösung getränkter dicker Bausch Fließpapier steckte, wie Fig. 12 zeigt. Der unter dem Muskel liegende Bausch stellt dann den Nebenschluß des unter einer oberflächlich verlaufenden Faser liegenden Gewebes dar. Ich beschreibe jetzt kurz die mit dieser Anordnung erhaltenen Kurven. Kurve 24, Taf. VIII (4. 6. X. 1911) gibt den diphasischen Aktionsstrom eines Sartorius bei Ableitung mit zwei Fadenelektroden und einer Zwischenstrecke von 4 mm wieder. Auch an dieser Kurve ist

vielleicht eine ganz schwache abortive zweite Erregung sichtbar. Kurve 25, Tafel VIII (5. 6. X. 11) ist aufgenommen, nachdem in der geschilderten Weise der Bausch Fließpapier unter den Muskel geschoben und die keilförmige Fließpapierelektrode auf den Muskel gelegt worden ist. Das Resultat ist ein nahezu einphasischer Strom. Wieder einen Beweis a fortiori liefert Kurve 26, Tafel VIII (6. 6. X. 11), nämlich dafür, daß die starke Schwächung der zweiten Phase in Kurve 25 nicht etwa auf Dekrement zu beziehen ist. Hier ist die keilförmige Elektrode entfernt worden, der Fließpapierbausch unter dem Muskel ist aber geblieben. Die Ableitung erfolgt aber diesmal mit zwei Fadenelektroden bei einer Zwischenstrecke von 20 mm. Dementsprechend ist die erste Phase von der zweiten durch eine längere Ruhepause der Saite getrennt, und trotz des Dekrements, mit dem sich die Erregung in der langen Strecke fortpflanzt, ist der Quotient der ersten und zweiten Phase kleiner als in Kurve 25. Für die eigentümliche langsame Saitenhebung während dieser Ruhepause werde ich später noch eine Erklärung geben. Den Einfluß dieses Nebenschlusses, den die Aktionsströme des Muskels finden, auf die Form der Stromkurve erkennt man deutlich aus Kurve 27, Tafel VIII (7. 6. X. 11), in der der Fließpapierbausch unter dem Muskel entfernt worden ist. Die Kurve zeigt diesmal ganz jene Form, die für eine Ableitung mit langer Zwischenstrecke (20 mm) typisch ist, und trotz des Dekrements ist sie noch ausgesprochen diphasisch. Zur Beurteilung der Genauigkeit, mit welcher der wahre Stromverlauf von der Saite wiedergegeben wird, teile ich hier eine Eichungskurve (28. Taf. VIII, 8. 6. X. 11) mit bei Einschaltung einer elektromotorischen Kraft von 20 Milli-Daniell in den Galvanometerkreis. In demselben befand sich außer der Saite von 1900 Ω noch der Muskel in der Anordnung von Kurve 27. Bei der außerordentlich starken Saitenspannung (20 Milli-Daniell ergaben eine Dauerablenkung der Saite in der Spaltebene von 9,5 mm bei einer 670 fachen Vergrößerung) war die Dämpfung nicht absolut. Inwieweit hierbei die Kondensatorwirkung bei dem hohen Widerstand im Kreis mitspielt, läßt sich nicht gut entscheiden. Die Saite passiert bereits nach 0,98 σ zum erstenmal

die neue Gleichgewichtslage und stellt sich nach 5,88 σ dauernd auf dieselbe ein. Auf die Bemerkungen Gartens über die Bedeutung einer starken Saitenspannung bei der Aufzeichnung von raschen, nur kurzdauernden Änderungen der Potentialdifferenz habe ich bereits früher verwiesen. Ebenso ist über die Entstellung der Kurven bereits oben einiges gesagt. Später habe ich dann noch, und zwar stets an einem Muskel, den Einfluß studiert, den der unter dem Muskel liegende Fließpapierbausch auf die Umwandlung eines diphasischen Stromes in einen monophasischen hatte, verglichen mit der vorher geschilderten Anordnung, in der er fehlte. Dabei stellte sich heraus, daß die Galvanometerausschläge infolge des Nebenschlusses etwas schwächer wurden, daß sich aber prinzipiell an den Kurven nichts änderte.

Im Anschluß hieran möchte ich noch eine Beobachtung erwähnen, die ich gelegentlich der Aufnahmen des Differentialelektrogramms am Muskel machen konnte. Schon lange war uns an den dazu gehörigen Hauptelektrogrammen (vgl. Kurve 1, 2, 3) eine von der Norm etwas abweichende Form aufgefallen, die entsprechend den Änderungen der Differentialelektrodenlage ebenfalls Veränderungen erkennen ließ. Da aber im übrigen die Ableitung wie sonst erfolgte, konnte diese Abweichung nur durch die aufgesetzte Differentialelektrode bedingt sein. Während die erste Phase eines diphasischen Aktionsstromes bei gewöhnlicher Ableitung mit großer Zwischenstrecke bald nach der Umkehr der Saitenbewegung einen trägen Rückgang zur Nullinie aufweist, der ganz an den Verlauf eines monophasischen Aktionsstromes erinnert und erst durch die steil einsetzende zweite Phase unterbrochen wird, ändert sich dieses Bild, sobald sich an irgendeiner Stelle des Muskels ein indifferenter Nebenschluß befindet. Die Kurven 1, 2 und 3 zeigen alle nach der ersten Phase eine mehr oder weniger deutliche zweite Saitenerhebung (siehe die mit * bezeichneten Stellen). In Kurve 3 ist sie infolge des Dekrements und der schon beginnenden zweiten Phase nur noch durch eine Verlangsamung der Saitenbewegung angedeutet. Der Zeitpunkt, in dem diese zweite Saitenerhebung beginnt,

ist, wie die drei Kurven zeigen, offenbar von der Lagerung der Differentialelektrode am Muskel abhängig. Wie ist aber nun diese charakteristische Veränderung des gewöhnlichen Bildes zu erklären? Zur Beantwortung dieser Frage wurden einige Versuche angestellt, bei denen zunächst ein typischer diphasischer Strom vom Sartorius aufgenommen wurde. An der ganzen Anordnung wurde dann weiter nichts geändert, als daß zwischen den beiden als Ableitungselektroden dienenden Baumwollfäden quer auf den

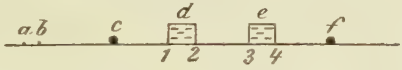


Fig. 13.

ausgespannten Sartorius einige ganz kurze, mit Ringerscher Lösung getränkte Baumwollfadenbündel gelegt wurden, wie Fig. 13 von der Seite zeigt. Hierdurch wurden die vorher rein diphasischen Ströme derart verändert, daß man mitunter an Bilder von Muskelrhythmen erinnert wird. Der Grad der Veränderung hängt natürlich von der Zahl und Ausdehnung der aufgelegten Fadenbündel ab. Zunächst einige Beispiele, in denen zwei getrennte Bündel, aus je 4 ca. 0,8 mm dicken Baumwollfäden bestehend, auf den Sartorius gelegt wurden. Kurve 29, Taf. VIII (9. 7. IX. 11) zeigt den gewöhnlichen diphasischen Aktionsstrom eines Sartorius bei einer Zwischenstrecke von 20 mm. Kurve 30, Taf. VIII (8. 7. IX. 11) zeigt den Aktionsstrom desselben Muskels, nachdem quer über den Muskel zwei Fadenbündel gelegt worden waren. Man kann sich die resultierende Form etwa so erklären: Jede Hebung der Saite entspricht einer überwiegenden Negativität eines der Reizstelle näher gelegenen Punktes, jede Senkung der Saite der Negativität eines von der Reizstelle weiter entfernten Punktes. Danach ist die erste Erhebung I der Saite auf das Eintreffen der Erregung in *c* (vgl. Fig. 13) zu beziehen. Gegenüber dem gewöhnlichen diphasischen Strom in Kurve 29 weist die Saite einen viel steileren Rückgang auf. Dieser ist dadurch bedingt, daß die mit dem Eintreffen der Negativitätswelle am Anfangspunkt des ersten Fadenbündels d_1 auftretende elektromotorische Kraft in dem Bündel und Muskel einen indifferenten

Ableiter nach der Ableitungselektrode *f* findet. In dem erweiterten Strombett bilden sich Stromzweige, die zum Teil entsprechend dem Sitz der elektromotorischen Kraft bei d_1 das Galvanometer so beeinflussen, als ob *f* negativ wäre. Ohne diese Erweiterung des Strombettes würde natürlich eine Negativität eines zwischen den Ableitungsstellen gelegenen Punktes ohne Einfluß auf das Galvanometer bleiben. Ist dann die Erregung am Endpunkt des ersten Fadenbündels 2 angelangt, so findet die Ausbreitung von Stromschleifen nach der umgekehrten Richtung statt. Wieder dient das Bündel und das Muskelstück von 1 bis *c* als indifferente Elektrode. Dadurch kommt die kleine Hebung II der Saite zustande. An dem zweiten Fadenbündel wiederholt sich dann derselbe Vorgang, der in der Kurve nur deshalb deutlicher zum Ausdruck kommt, weil hier die Saite in viel langsamerer Bewegung ist (vgl. Hebung III in Kurve 30, Taf. VIII [9. 7. IX. 11]). Nach der dritten Erhebung setzt dann mit dem Eintreffen der Erregung in *f* steil die eigentliche zweite Phase ein. Ich lasse hier noch eine weitere Kurve folgen (Kurve 31, Taf. VIII 7. 7. IX. 11), zu der mir leider der zugehörige doppelphasische Strom fehlt. Beim Anfeuchten des Muskels waren die Elektroden angestoßen und die Fäden verschoben worden. Trotzdem bilde ich sie ab, weil die zweite Erhebung sehr schön zu sehen ist.

Ganz eigenartige Bilder bekommt man, wenn man ein Fadenbündel in längerer Ausdehnung auf den Muskel legt (Fig. 14),

Fig. 14.

wie es z. B. Kurve 32, Taf. VIII (5. 7. IX. 11) zeigt. Kurve 33, Taf. VIII (6. 7. IX. 11) gibt den dazugehörigen diphasischen Aktionsstrom wieder. Die erste Erhebung I der Saite entspricht in Kurve 32 dem Auftreten der Erregung in *c*, die Senkung, die hier viel steiler als in Kurve 33 erfolgt, dem Negativwerden von *d*. Das Fadenbündel dient mit dem Muskel als indifferenter Ableiter von Stromschleifen nach *f*. Die zweite Saitenerhebung II ist auf das Eintreffen der Erregung in *e* zu beziehen. Die in dem dicken

Bündel sich ausbreitenden Stromschleifen finden jetzt günstige Ableitungsbedingungen nach *c*. Die zweite Senkung der Saite ist durch die zweite Hauptphase, also die Negativität von *f*, bedingt. Die Saite erreicht aber hier infolge der Überlagerung der Phasen noch nicht einmal ganz die Nullinie. Über die kleine dritte Erhebung kann ich selbst keine sichere Auskunft geben. Vielleicht ist sie dadurch bedingt, daß infolge des Dekrements die Erregung an *f* kleiner und kürzer ausfällt als an *e*. Einen analogen Versuch zeigen die Kurven 34, Taf. VIII (8. 19. IX. 11) und 35. Taf. VIII (6. 19. IX. 11). Kurve 34 gibt den diphasischen Aktionsstrom eines Sartorius bei einer Zwischenstrecke von 23 mm wieder. In Kurve 35 ist ein Baumwollfadenbündel von 12 mm Länge und 3 mm Dicke etwa in der Mitte zwischen den Ableitungselektroden auf den Muskel gelegt worden. Die erste Erhebung I der Saite entspricht wieder der Negativität von *c*, dann kehrt die Saite etwas früher um als in Kurve 34 und geht rascher nach der Nullinie zurück; es tritt eine starke Gegenphase auf, die durch das Eintreffen der Erregung an *d* bedingt ist. Wieder dient das dicke Fadenbündel, in dem sich zahlreiche Stromzweige ausbreiten, mit dem Muskel als indifferente Elektrode für die Ableitungselektrode *f*. Ist die Erregung im Muskel unter der Mitte des Bündels angelangt, so breiten sich die Stromschleifen nach beiden Seiten symmetrisch in dem Bündel aus. Da sie im Galvanometerkreis einander entgegengesetzt verlaufen, so kompensieren sie sich. Der Rückgang (II) der Saite ist erstens bedingt durch das Abklingen der Erregung an *d*, zweitens durch das Anwachsen der Negativität an *e*. Die Erhebung über die Nullinie ist nur gering, entsprechend dem Dekrement, mit dem sich die Erregung in der 12 mm langen Muskelstrecke fortgepflanzt hat. Ohne dies Dekrement dürfte man eine stärkere dritte Phase erwarten. Außerdem wird diese abgekürzt durch die eigentliche zweite Hauptphase, die mit dem Eintreffen der Erregung an *f* steil einsetzt. Dieser Versuch stellt gewissermaßen ein Negativ dar zu einem Versuch von Hering, dessen Kenntnis ich einer mündlichen Mitteilung von Herrn Prof. Dr. Garten verdanke. Der kuraresierte Sartorius wird von einem konstanten Strome durchflossen. Läßt

man dann intrapolar einen Tropfen Ringersche Lösung auf den Muskel auffallen, so genügen die in dem Flüssigkeitsmantel neu auftretenden Stromschleifen, um eine Erregung des Muskels hervorzurufen, und zwar auch dann, wenn merkliche Schwankungen der Gesamtintensität durch Einschaltung sehr großer Widerstände in den Stromkreis vermieden sind. Das Prinzip der Anordnung ist hier wie dort dasselbe. Nur wird hier ein konstanter Strom in seinem Verlauf so abgeändert, daß er eine Erregung hervorzurufen vermag, dort wird der abgeleitete Aktionsstrom in der geschilderten Weise beeinflußt. Übrigens stellen die vorher mitgeteilten Befunde nicht nur ein ganz nettes Kuriosum dar, sondern die neu gewonnenen Gesichtspunkte lassen sich auch sehr wohl für die Betrachtung des Elektrokardiogramms heranziehen.

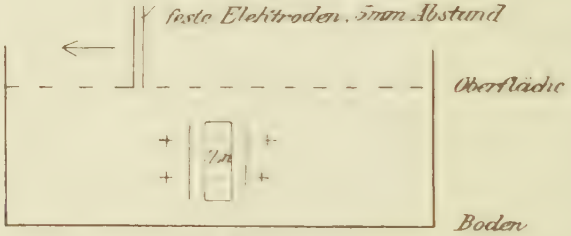


Fig. 15.

Gelegentlich habe ich dann noch Modellversuche über die Ausbreitung der Stromschleifen in schematischen, dem erregten Muskel nachgebildeten Anordnungen angestellt, um für die obigen Betrachtungen das durch Rechnung nur sehr schwer zu gewinnende physikalische Material zu erhalten. Auch als Demonstrationsversuche dürften sich die unten mitgeteilten Experimente recht gut eignen. Der Muskel oder Nerv wurde bei diesen Versuchen durch einen länglichen, rechteckigen Holzkasten vertreten, der im Innern ausgepicht und mit verdünnter Zinksulfatlösung gefüllt war. Als Sitz der mit der Erregung auftretenden elektromotorischen Kraft fungierten drei amalgamierte, durch Hartgummi isolierte Zinkplatten, die einander parallel, senkrecht zur Längsachse des Kastens, in die Flüssigkeit vollkommen eintauchten. Fig. 15 zeigt schematisch ihre Anordnung in dem

Kasten von der Seite. Die mittlere Platte war mit dem — Pol von zwei hintereinandergeschalteten Akkumulatoren verbunden, während die beiden anderen Platten gemeinsam an den + Pol der Akkumulatoren angeschlossen waren. Die Leitung des Stromes nach den Platten durch die Flüssigkeit hindurch war gut isoliert, so daß von diesen Verbindungsdrähten aus keine Stromschleifen in die Lösung treten konnten. Zur Abschwächung des Stromes waren in den Kreis noch 20 Ω eingeschaltet. Von der Verteilung der elektrischen Spannung an der Oberfläche dieser Flüssigkeitsmasse kann man sich aus den Fig. 16 und 17 S. 152 ein Bild machen. Auf beiden Figuren sind unten die Zinkplatten im Querschnitt in $\frac{1}{2}$ der natürlichen Größe gezeichnet, 2,5 cm unter dem als Nullinie gedachten Flüssigkeitsspiegel in Fig. 16 und 1 cm tief in Fig. 17.

Die Kurven selbst sind auf folgende Art gewonnen: Zwei Zinkstäbe wurden ganz scharf zugespitzt und bis zu der Spitze mit Paraffin umhüllt. Die beiden Stäbe wurden dann mit Paraffin so zusammengeschmolzen, daß ihre Spitzen 5 mm voneinander entfernt waren, und ihre anderen Enden mit dem Saitengalvanometer verbunden. Dann wurden die Zinkspitzen mit der Oberfläche der Lösung gerade in Berührung gebracht, und der Akkumulatorenstrom wurde geschlossen. Bei den hier mitgeteilten Versuchen waren die Zinkspitzen zum Kasten so orientiert, daß ihre Verbindungslinie mit der Längsachse des Kastens parallel lief. Die Nullstellung der Elektroden läßt sich bei solchen Versuchen sehr einfach dadurch bestimmen, daß bei ihr gar kein Saitenausschlag erfolgt, weil die symmetrischen Stromschleifen, die auf beiden Seiten durch die Flüssigkeit gehen und in den Galvanometerkreis einbrechen, sich gegenseitig kompensieren. Bewegt man nun die Zinkelektroden in der Richtung der Längsachse des Kastens, so ändern sich die Ausschläge der Saite entsprechend der größeren oder kleineren Potentialdifferenz, die an den beiden Zinkspitzen herrscht. Die Messung der Saitenausschläge erfolgte mit Hilfe der auch sonst benutzten Kompensationseinrichtung und die Bewegung der Zinkelektroden mit Hilfe eines mit Trieb versehenen, horizontal montierten

Zimmermannstatives. Nach jeder Verschiebung der Zinkelektroden (zuerst immer um 5 mm) wurde der Saitenausschlag auf 0 kompensiert und die Stellung des Schiebers am Rheostaten notiert. Die Ergebnisse von zwei derartigen Versuchen sind in der folgenden Tabelle mitgeteilt (Fig. 16 und 17). In den Fig. 16 und 17 sind die erhaltenen Werte in Kurvenform aufgezeichnet. $\frac{1}{2}$ mm der Abszisse bedeutet 1 mm Verschiebung der Zinkspitzen an der Oberfläche; als Ordinatenwerte sind in der jeweiligen Entfernung vom Nullpunkt die jedesmal abgelesenen Werte eingetragen. Die Kurven stellen also die relativen Größen der Potentialdifferenz zweier benachbarter Oberflächenpunkte dar, die 5 mm voneinander entfernt sind. Das Maximum der einen Kurve (Fig. 17), bei der die Tiefe der Zinksulfatlösung bis auf den oberen Rand der Zinkplatten 1 cm betrug, liegt senkrecht über dem Zwischenraum von zwei Zinkplatten, das der anderen (Tiefe 2,5 cm) ist etwas seitlich hinausgerückt. Die Form der Kurven im einzelnen

Tabelle.

Größe der Zinkplatten: mittlere 50 × 50 × 10 mm;
jede seitliche 50 × 50 × 1 mm.

Entfernung der mittleren von den äußeren Zinkplatten 5 mm.

Tiefe der $ZnSO_4$-Lösung bis zum oberen Rand der Zinkplatte			
2,5 cm		1 cm	
Entfernung von 0 in cm	Relative Potentialdifferenzen	Entfernung von 0 in cm	Relative Potentialdifferenzen
0,5	25,7	0,5	52,8
1	44,7	1	68,2
1,5	54,5	1,5	45,5
2	54,3	2	25,5
2,5	49,8	2,5	16,0
3	39,0	3	11,5
3,5	33,0	3,5	9,5
4	28,9	4	8,7
4,5	26,4	6	8,4
5	23,7	14	8,4
6	20,6		
9	18,0		
14	18,0		

ist lediglich bedingt durch die hier gewählte Versuchsanordnung. Bei der geringen Tiefe von 1 cm steigt die Kurve (Fig. 17) sehr steil

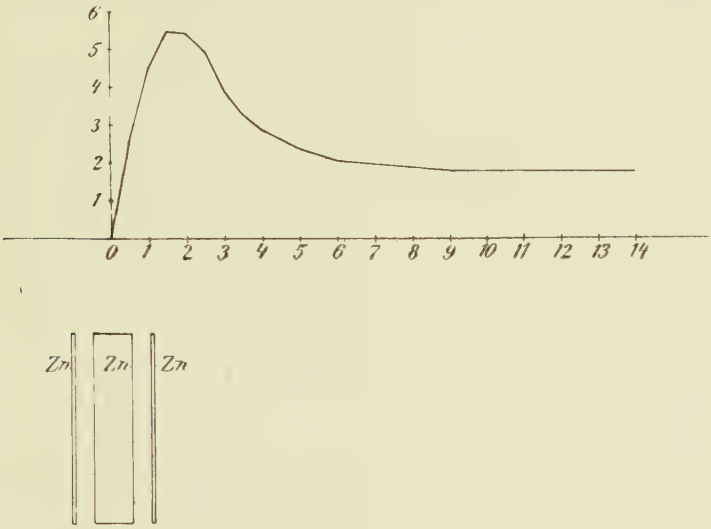


Fig. 16.

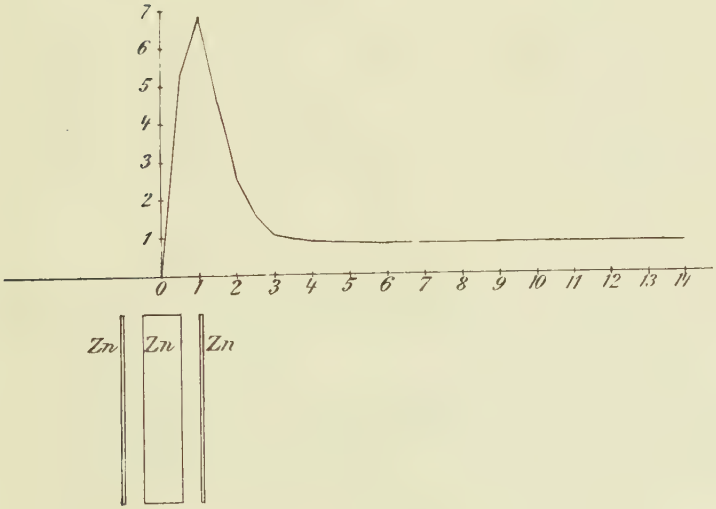


Fig. 17.

an und erreicht sehr rasch ihr Maximum. Der Abfall erfolgt zuerst auch noch sehr steil und geht dann ziemlich brüsk in eine fast horizontale Linie über. Die andere Kurve (Tiefe 2,5 cm, Fig. 16)

zeigt einen sanfteren Anstieg, ein breites Plateau und einen allmählichen Abfall, der auch, allerdings nicht so plötzlich, in eine fast horizontale Linie übergeht. In größerer Entfernung von dem Sitz der elektromotorischen Kraft ist also an der Oberfläche einer solchen Flüssigkeitsmasse praktisch kein Unterschied mehr zwischen der Potentialdifferenz von zwei Punkten, die man verschiebt, zu erkennen. Auch ohne mathematische Begründung geben die Kurven ein ganz übersichtliches Bild über die Verteilung der elektromotorischen Kräfte an der Oberfläche einer solchen Flüssigkeitsmasse, und die Resultate lassen sich wohl mutatis mutandis auf den Muskel oder Nerven, in dem an einer Stelle eine Erregung Platz greift, übertragen. Danach treten stärkere Potentialdifferenzen an der Oberfläche zwischen zwei Nachbarpunkten, wie die Kurven eindeutig zeigen, nur dann auf, wenn der elektrische Prozeß sich in der nächsten Nähe der ableitenden Elektroden abspielt. Je tiefer der Sitz der elektromotorischen Kraft unter der Oberfläche liegt, desto breiter wird der in Mitleidenschaft gezogene Teil der Oberfläche, desto geringer aber auch die elektromotorische Kraft.

Das Fortschreiten der Erregung in einem Muskel oder Nerven konnte ich auch recht gut auf folgende einfache Art nachahmen: In die Zinksulfatlösung wurden zwei amalgamierte Zinkstäbe, die mit dem Saitengalvanometer verbunden waren, in einer Entfernung von mehreren Zentimetern getaucht und die drei miteinander fest verbundenen Zinkplatten an einer festen Handhabe unter den zwei Zinkstäben durch die Flüssigkeit hindurchgeführt. Natürlich sind bei diesem rohen Verfahren keine technisch hervorragenden Kurven zu erwarten. Dennoch sieht man in Kurve 36, Taf. VIII (4. 19. XI. 11) sehr schön den resultierenden diphasischen »Aktionsstrom.« Die Zwischenstrecke zwischen den beiden Zinkelektroden betrug 14 cm, entsprach also beim Muskel einer langen Zwischenstrecke, und demgemäß sieht man zwei durch eine längere Pause getrennte Phasen. Verkleinert man dann die Zwischenstrecke z. B. auf 2 cm, so erhält man Bilder, wie sie Kurve 37, Taf. VIII (4. 19. XI. 11) zeigt, wo die erste Phase direkt in die zweite übergeht.

Übrigens kann man auch jene Veränderungen der Stromkurve ohne weiteres erhalten, wie ich sie auf Seite 146–150 bei Auflagerung von indifferenten Nebenschlüssen auf den Muskel beschrieben habe. So erhielt ich z. B. Kurve 38, Taf. VIII (2. 19. XI. 11) unter den gleichen Bedingungen wie Kurve 36. Nur wurde während des Versuchs ein Nebenschluß durch ein umgekehrt eingetauchtes, mit Zinksulfatlösung gefülltes Wasserglas in der Mitte des Kastens gebildet (vgl. Fig. 18).

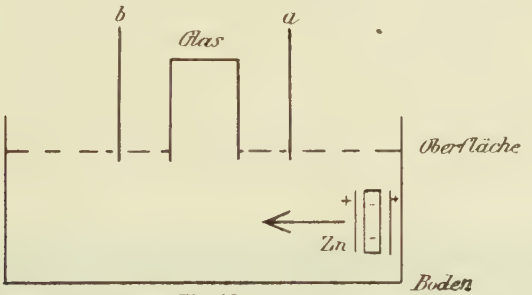


Fig. 18.

Auch für jene Versuche am Sartorius, die sich mit der Umwandlung eines diphasischen Stromes in einen nahezu monophasischen durch Änderung der Ableitungsbedingungen beschäftigten, konnte ich eine Bestätigung an einem analogen Modell erhalten. Als solches diente ein Holzkasten, dessen Längsschnitt Fig. 19 wiedergibt. Führt man die als Sitz der elektromotorischen Kraft wirkenden Zinkplatten bei *c* in der Richtung der Pfeile nach unten entsprechend dem Verlauf einer von der Oberfläche in die Tiefe abbiegenden Faser, so erhält man bei Ableitung von *a* und *b* einen Strom mit sehr starker erster und sehr schwacher entgegengesetzter zweiter Phase (Kurve 39, Taf. VIII [5. 19. XI. 11]). Bei horizontaler Führung der Zinkplatten tritt dagegen ein diphasischer Strom mit gut ausgeprägten, fast symmetrischen Phasen auf. Allerdings bleibt die Erweiterung des Strombettes und die dadurch bedingte gute Nebenschließung unter *b* auch bei horizontaler Führung der Zinkplatten auf die Form der Kurve (namentlich auf die Größe der zweiten Phase) nicht ganz ohne jeden Einfluß (Kurve 40, Taf. VIII [6. 19. XI. 11]). Die Zwischenstrecke

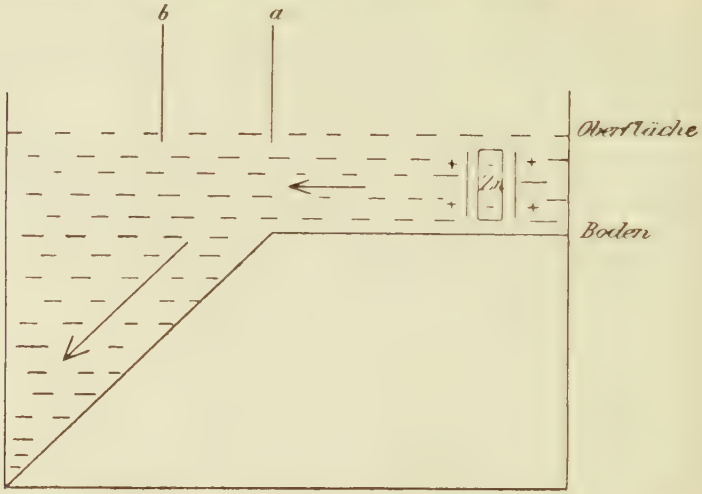


Fig. 19.

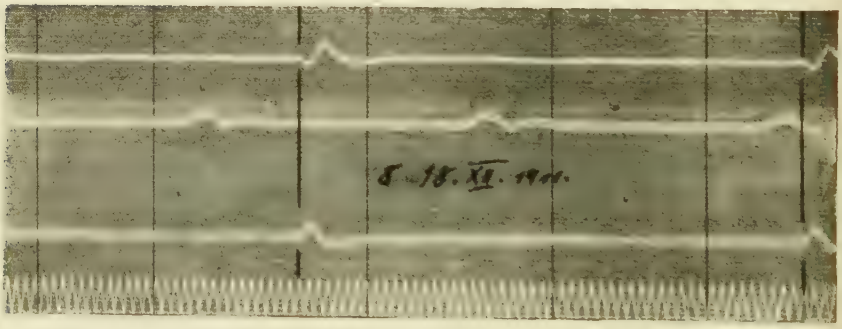


Fig. 20.

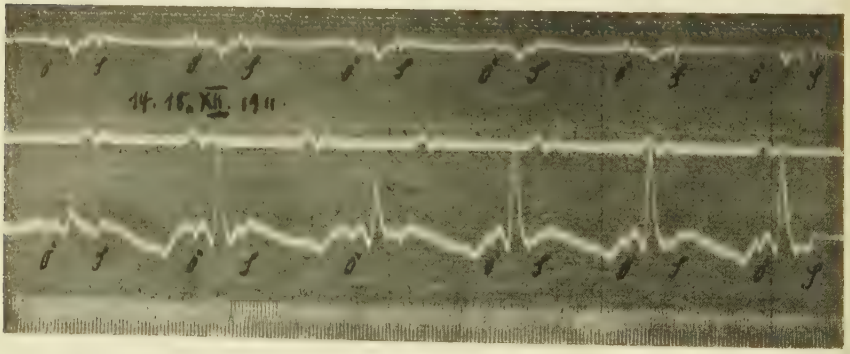


Fig. 21.

der Zinkelektroden betrug in den beiden letzten Versuchen 7 cm. Durch diese Versuche konnten also die obigen schematischen Experimente zur Erzeugung eines monophasischen Aktionsstromes am unverletzten Muskel vollständig bestätigt werden.

Zusammenfassung.

1. Es wird eine Methode angegeben, die eine streng lokalisierte, nahezu punktförmige Ableitung tierischer Ströme gestattet.

2. Die Prüfung der Methode am kuraresierten Sartorius ergibt ihre Brauchbarkeit.

3. Es werden typische Kurven mitgeteilt, die mit Hilfe der Methode an verschiedenen Stellen des spontan schlagenden, im Tier nur freigelegten Frosch- und Schildkrötenherzens gewonnen sind. Aus denselben geht hervor, daß T nicht auf einen lokalen Prozeß an der Herzbasis zu beziehen ist. Sie ergeben ferner eine nahezu völlige Gleichzeitigkeit im Eintritt der Aktionsströme an verschiedenen Stellen der Herzoberfläche. Auch am Säugetierherzen ist diese Gleichheit in dem Eintritt der Aktionsströme an verschiedenen Stellen der Herzoberfläche zu beobachten.

4. Die Gleichzeitigkeit tritt nicht auf bei künstlicher Reizung des Ventrikels (Frosch- und Säugetierherz). (Will man unter Annahme einer geradlinigen Fortpflanzung der Erregung bei künstlicher Reizung eine Leitungsgeschwindigkeit berechnen, so ergibt sich in diesem Fall für das Froschherz ein Wert von ca. 32 cm.)

5. Es wird über eine Reihe von Modellversuchen am Sartorius berichtet, die sich mit der Frage der Umwandlung diphasischer Ströme in monophasische beschäftigen.

6. An einigen Kurven wird die Abhängigkeit der Stromkurvenform von Nebenschlüssen, die sich am Muskel befinden, demonstriert.

7. Es werden zwei Kurven mitgeteilt, die ein Bild von der Verteilung der elektrischen Spannung an der Oberfläche einer Salzlösung, in der ein Strom fließt, geben.

8. Es wird eine Versuchsanordnung beschrieben, die es gestattet, das Fortschreiten der Erregung in einem Muskel oder Nerven an einem Modell nachzuahmen.

9. Modellversuche mit dieser Anordnung bringen eine Bestätigung der unter 5 und 6 erwähnten Befunde.

Zum Schlusse spreche ich auch an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. Garten für die Anregung zu dieser Arbeit, für die aufopfernde, liebenswürdige Hilfe bei den Versuchen und die wertvollen Ratschläge bei der Zusammenstellung der Ergebnisse meinen herzlichsten Dank aus.

Erklärung der Tafelfiguren.

Die Kurven 1—3 und 18—35 sind von rechts nach links, die Kurven 4—17 und 36—40 von links nach rechts zu lesen. In den Muskelkurven entspricht eine Hebung des Saitenbildes einer überwiegenden Negativität des der Reizstelle näher gelegenen Ableitungspunktes, in den Elektrokardiogrammen einer überwiegenden Negativität des der Basis zunächst gelegenen Ableitungspunktes. Am Fuß oder am Kopf der Kurven findet sich die Zeitmarkierung in $^1/_5$ oder $^1/_{148}$ Sek., in manchen ist die Markierung sowohl in $^1/_5$ als auch in $^1/_{148}$ Sek. erfolgt. Der Reizmoment *R* ist durch die Senkung des ebenfalls am Fuß der Kurven verzeichneten Hebelschattens des Garten schen Kontaktapparates in den Muskelkurven gekennzeichnet oder, wie in Kurve 17, durch Induktionszacken. *S* stellt die Galvanometersaite dar. Das Hauptelektrogramm ist in manchen Kurven noch mit Hilfe eines mittleren Elektromagnetsaitengalvanometers registriert. Bei diesen Kurven findet sich dann stets der Vermerk: M. S. G.

Kurve 1—3 (Taf. VIII) bringt unten den diphasischen Strom eines kurarisierten Sartorius, bei einer Zwischenstrecke von 20 mm, oben das Differentialelektrogramm verschiedener Muskelstellen, die zwischen den beiden Hauptableitungselektroden liegen. Temp. 22° C. Die genaueren Angaben finden sich in Tabelle I auf S. 117.

Kurve 4—17 zeigt die Kombinationen von Elektrogrammen vom Frosch- und Schildkrötenherzen.

Kurve 4 (Taf. VII). Froschherz, unten Hauptelektrogramm, oben Differentialelektrogramm der Herzbasis dicht an der Aortenwurzel links.

Kurve 5 (Taf. IV). Schildkrötenherz, unten Hauptelektrogramm (M. S. G.), oben Differentialelektrogramm der Herzbasis direkt links neben der Aorta.

Kurve 6 (Taf. III). Froschherz, unten Hauptelektrogramm (M. S. G.), oben Differentialelektrogramm der Herzbasis links vom Conus arteriosus.

Kurve 7 (Taf. III). Froschherz, unten Differentialelektrogramm der Herzspitze, oben Hauptelektrogramm.

Kurve 7a (Taf. V). Schildkrötenherz, unten Hauptelektrogramm (M. S. G.), oben Differentialelektrogramm der Herzspitze. (Die kleinen, nach oben gerichteten, unregelmäßig auftretenden Zacken der oberen Saite sind durch das Zucken der einen Bogenlampe bedingt. Vgl. in der unteren Kurve die hellen breiten »Ordinaten«.)

Kurve 8 (Taf. IV). Froschherz, unten Differentialelektrogramm der Herzspitze, oben Differentialelektrogramm der Basis. (Auch in dieser Kurve sind kleine Induktionszacken, die durch das Flackern der Bogenlampe bedingt sind, zu sehen.)

Kurve 9 (Taf. VI). Froschherz, unten Hauptelektrogramm, oben Differentialelektrogramm der Ventrikelmitte.

Kurve 10 (Taf. IV). Schildkrötenherz, unten Hauptelektrogramm (M. S. G.), oben Differentialelektrogramm der Ventrikelmitte.

Kurve 11 (Taf. IV). Froschherz, unten Differentialelektrogramm der Ventrikelmitte, oben das der Herzbasis.

Kurve 12 (Taf. V). Schildkrötenherz, unten Hauptelektrogramm (M. S. G.), oben Differentialelektrogramm der Herzbasis von der Rückseite des Ventrikels.

Kurve 13 (Taf. V). Schildkrötenherz, unten Hauptelektrogramm (M. S. G.), oben Differentialelektrogramm derVentrikelmitte von der Rückseite.

In Kurve 12 und 13 bedeutet eine Hebung der Saite in den Differentialelektrogrammen eine überwiegende Negativität des nach der Spitze zu gelegenen Ableitungspunktes.

Kurve 14 (Taf. VI). Froschherz, unten Differentialelektrogramm der Mitte des linken Vorhofs, oben Hauptelektrogramm.

Kurve 15 (Taf. VI). Froschherz, unten Hauptelektrogramm (M. S. G.), oben Differentialelektrogramm vom linken Vorhof.

Kurve 16 (Taf. VII). Schildkrötenherz, unten Hauptelektrogramm (M. S. G.), oben Differentialelektrogramm vom linken Vorhof.

Kurve 17 (Taf. VII). Froschherz, künstliche Reizung mit einzelnen Induktionsschlägen (Induktorium mit Eisenkern, 2 Akkum., 5 Ω, R. A. 7), oben Differentialelektrogramm der Basis, unten das der Vorderseite des Ventrikels ganz nahe der Herzspitze.

Kurve 18—34 (Taf. VIII) zeigt Aktionsstromkurven vom kuraresierten Sartorius.

Kurve 18. Dreiphasischer Strom eines kuraresierten Sartorius. Ableitung vom Muskel in etwa gleichen Abständen.

Kurve 19. Aktionsstrom desselben Muskels, nachdem die dritte Elektrode dicht an die zweite herangerückt worden ist.

Näheres über Kurve 18 und 19 siehe im Text S. 141 u. 142, Tab. II.

Kurve 20. Diphasischer Aktionsstrom eines kuraresierten Sartorius mit 8 mm Zwischenstrecke zwischen *c—d*.

Kurve 21. Aktionsstrom desselben Muskels, nachdem in der geschilderten Weise (vgl. Text S. 143) ein keilförmiger Bausch Fließpapier (Textfig. 11) auf den Muskel gelegt worden ist, von dem dann die Ableitung erfolgt. 8 mm Zwischenstrecke.

Kurve 22. Desgl. wie 21, Zwischenstrecke $c-d$ jedoch nur 1 mm.

Kurve 23. Desgl. wie 20, Zwischenstrecke jedoch 9 mm.

Tabelle III zu Kurve 20—23 (vgl. Textfig. 11).
Temp. 19,5° C.

Nr.	1 Ordinate in σ	$a-b$	$b-c$	$c-d$	$c-d_1$	RA	Eichung mit 20 MD ergab Ablenkung in mm	$h_1 : h_2$
		in mm				in cm		
Kurve 20	0,72	2	6	8	—	7,5	22	1 : 0,59
» 21	0,71	2	6	8	17	7,5	-	1 : 0,3
» 22	0,70	2	6	1	17	7,5	—	1 : 0,24
» 23	0,70	2	6	9	—	7,5	-	1 : 0,63

Kurve 24. Diphasischer Aktionsstrom eines kuraresierten Sartorius bei einer Zwischenstrecke von 4 mm.

Kurve 25. Aktionsstrom desselben Muskels, nachdem in der geschilderten Weise (vgl. Text S. 144) ein Bausch Fließpapier unter den Muskel geschoben worden ist (Textfig. 12). Die zweite Ableitung nach dem Galvanometer erfolgt von der Kuppe eines Fließpapierkeiles, der auf dem Muskel liegt. Zwischenstrecke 4 mm.

Kurve 26. Diphasischer Aktionsstrom desselben Muskels, bei einer Zwischenstrecke von 20 mm. Unter dem Muskel liegt ein Bausch Fließpapier. Die zweite Ableitung erfolgt mittels einer gewöhnlichen Fadenelektrode.

Kurve 27. Desgl. wie Kurve 26; es fehlt aber diesmal der Bausch Fließpapier unter dem Muskel. Zwischenstrecke 20 mm.

Kurve 28. Eichung mit 20 Milli-Daniell. Der Muskel in der Anordnung aus Kurve 27 befindet sich im Saitenkreis.

Tabelle IV (vgl. Textfig. 12). Temp. 15° C.

Nr.	1 Ordinate in σ	$a-b$	$b-c$	$b-c_1$	$c-d$	$d-e$	RA	Eichung mit 20 MD ergab Ausschlag in mm	$h_1 : h_2$
		in mm					in cm		
Kurve 24	0,75	2,5	13,4	—	4	—	8,5	—	1 : 0,716
» 25	0,75	2,5	13,4	12,4	4	16	8,5	—	1 : 0,215
» 26	0,75	2,5	13,4	12,4	20	—	8,5	—	1 : 0,283
» 27	0,76	2,5	13,4	—	20	—	8,5	9,5	1 : 0,287
» 28	0,75	—	—	—	—	—	—	9,5	—

Kurve 29. Diphasischer Aktionsstrom eines kuraresierten Sartorius bei einer Zwischenstrecke von 20 mm.

Kurve 30. Aktionsstrom desselben Muskels, nachdem zwei Fadenbündel quer über den Muskel gelegt worden sind.

Kurve 31. Desgl. wie Kurve 30. (Einzelne Entfernungen nicht genau bekannt.)

Tabelle V zu Kurve 29—31 (vgl. Textfig. 13 S. 147). Temp. 21,7° C.

Nr.	$a-b$	$b-c$	$c-d$	d	$d-e$	e	$e-f$	Eichung mit 20 MD ergab Ausschlag in mm
	in mm							
Kurve 29	2,5	7	Baumwollfäden entfernt $c-f=20$					—
» 30	2,5	7	5	3,5	4	3,5	4	11

Kurve 32. Aktionsstrom eines kuraresierten Sartorius, nachdem etwa in der Mitte zwischen den beiden Ableitungsstellen ein 7,5 mm langes Fadenbündel quer über den Muskel gelegt worden ist. Zwischenstrecke 16,3 mm.

Kurve 33. Diphasischer Aktionsstrom desselben Muskels bei gewöhnlicher Ableitung und gleicher Zwischenstrecke.

Kurve 34. Diphasischer Aktionsstrom eines kuraresierten Sartorius bei einer Zwischenstrecke von 23 mm.

Kurve 35. Aktionsstrom desselben Muskels, nachdem etwa in der Mitte zwischen den beiden Ableitungselektroden ein 12 mm langes und 3 mm dickes Fadenbündel aufgesetzt ist. Zwischenstrecke wie vorher 23 mm.

Tabelle VI zu Kurve 32—35 (vgl. Textfig. 14 S. 148).

Nr.	$a-b$	$b-c$	$c-d$	$d-e$	$e-f$	RA	Eichung mit 20 MD ergab Ausschlag in mm	Temp.
	in mm					in cm		° C
Kurve 32	2,5	7,7	4,4	7,5	4,4	6,5	—	21,7
» 33	2,5	7,7	$c-f=16{,}3$ mm			6,5	11	21,7
» 34	2	9,7	$c-f=23$ »			7,5	12	19
» 35	2	9,7	5	12	6	7,5	—	19

Kurve 36. »Diphasischer Aktionsstrom« an dem Muskelmodell mit langer Zwischenstrecke (14 cm).

Kurve 37. »Diphasischer Aktionsstrom« an dem Muskelmodell mit kurzer Zwischenstrecke (2 cm).

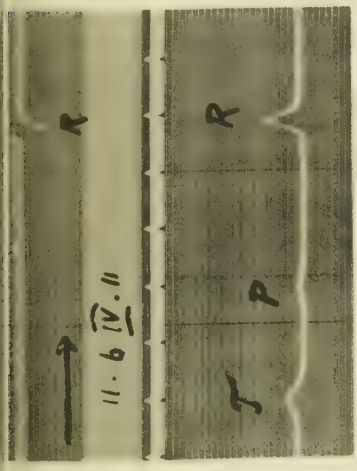
Kurve 38. »Aktionsstrom« desselben Muskelmodells mit Bildung eines Nebenschlusses am »Muskel« (vgl. Textfig. 18 S. 155).

Kurve 39. Modellversuch zur Demonstration der Stromkurve beim Abbiegen einer oberflächlichen Faser in die Tiefe (vgl. hierzu die Kurven 20—28, ferner die Textfig. 11, 12 S. 143—144 und 19 S. 159).

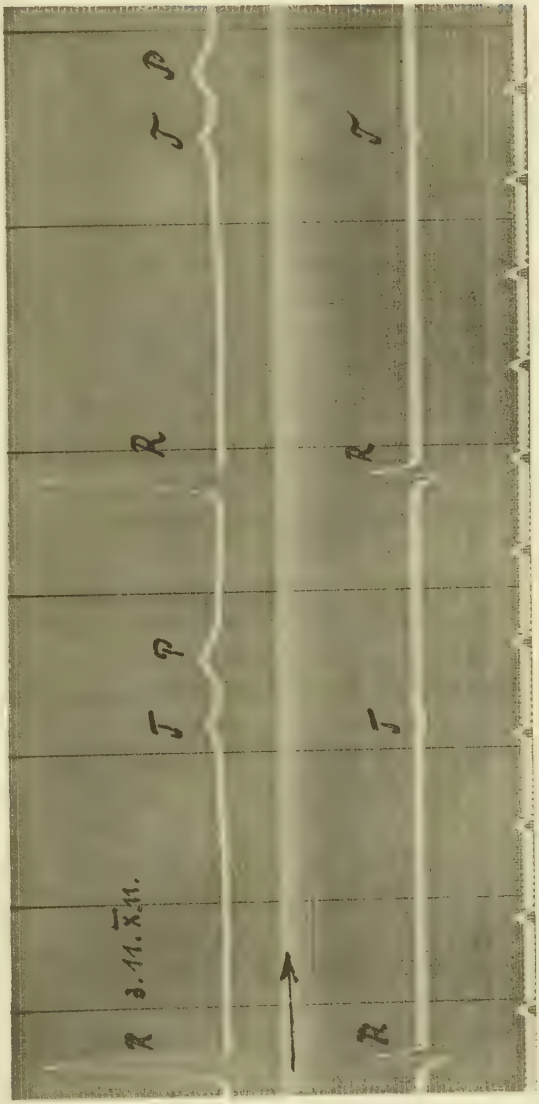
Kurve 40. Modellversuch für Demonstration der Stromkurve bei einem der Oberfläche parallelen Faserverlauf.

Lebenslauf.

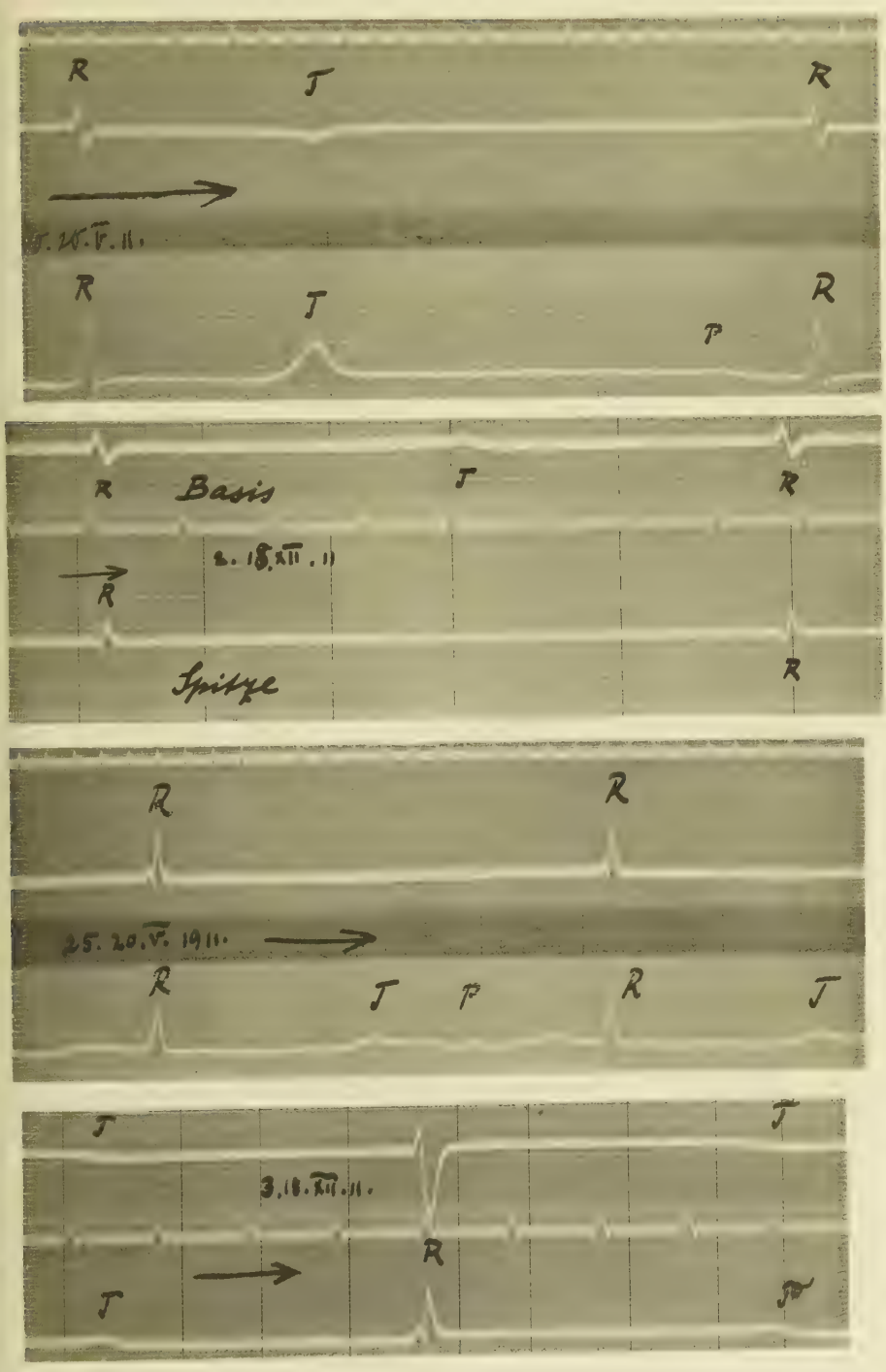
Ich, Ernst Clement, wurde am 20. Oktober 1889 zu Seligenstadt a. M., Kreis Offenbach geboren. Ich besuchte vom 6. Jahre ab 3 Jahre lang die Volksschule in Butzbach, dann 2 Jahre die Realschule in Butzbach und 7 Jahre lang das Gymnasium zu Friedberg (Hessen). Das Reifezeugnis erhielt ich am 20. Februar 1908. Ich studierte dann 1 Semester in Giessen, das zweite in München und darauf wieder 8 Semester in Giessen. Die ärztliche Vorprüfung bestand ich am Ende des V. Semesters (SS 1910) in Giessen und das ärztliche Staatsexamen nach dem X. Semester im Mai 1913 in Giessen.

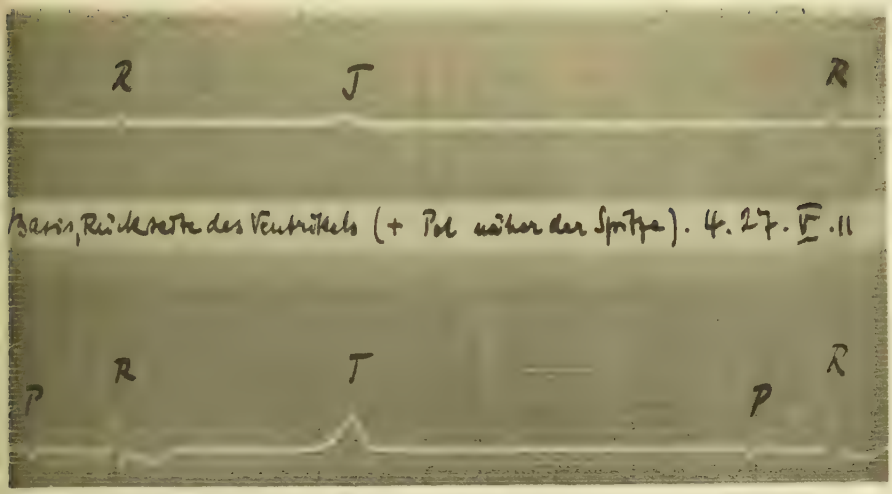


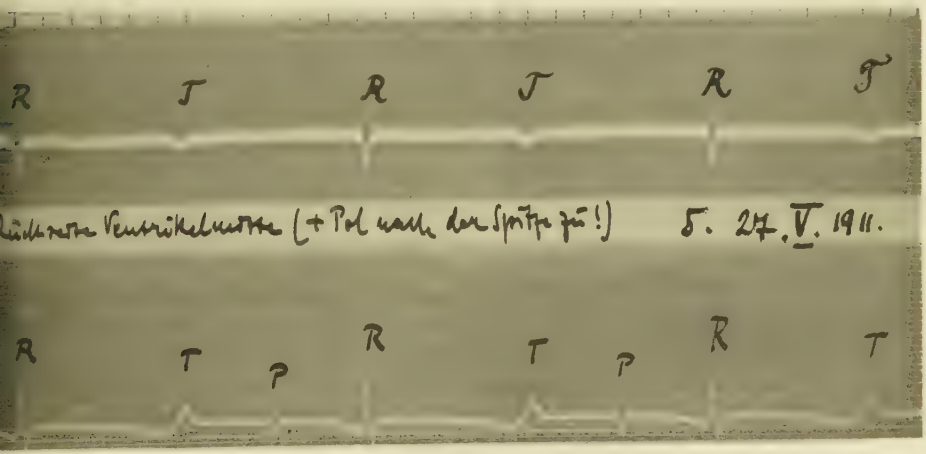
6

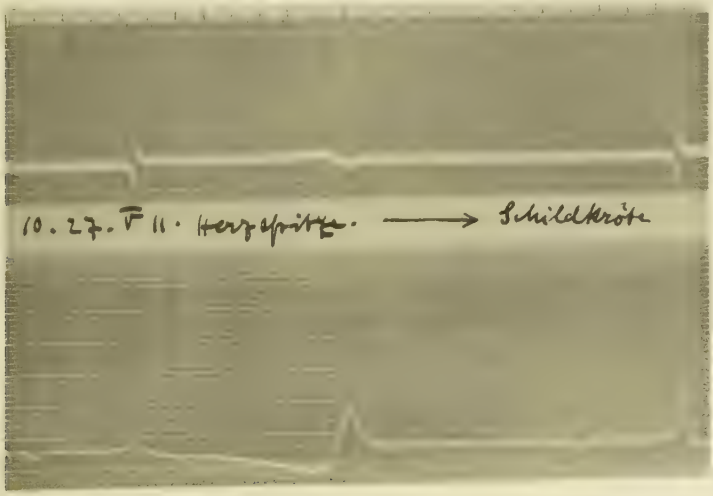


7


R
T
R
R
T
P
R
R
Basis
T
R
R
Spitze
R
R
R
T
P
R
T
T
T
R
T


R
T
R
Basis, Rückseite des Ventrikels (+ Pol unter der Spitze). 4. 27. V. 11
P
R
T
P
R

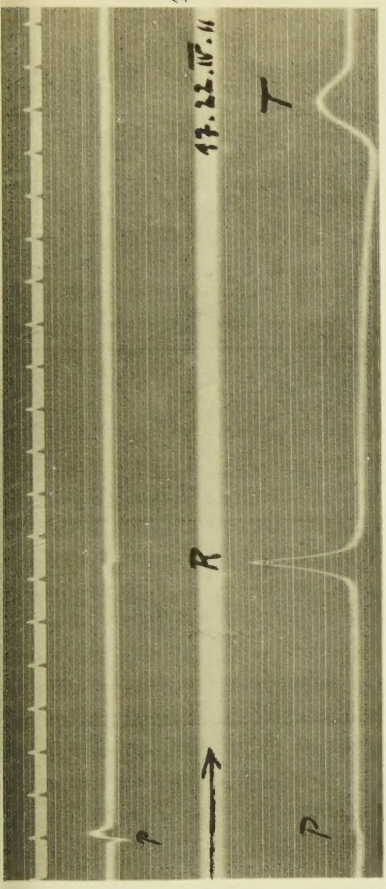

R
T
R
T
R
T
Rückseite Ventrikelmitte (+ Pol nach der Spitze zu!) 5. 27. V. 1911.
R
T
P
R
T
P
R
T


10. 27. V 11. Herzspitze. ⟶ Schildkröte

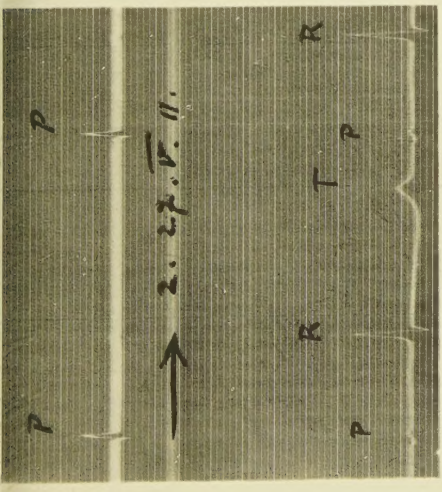
7a

Verlag von R. Oldenbourg in München und Berlin.

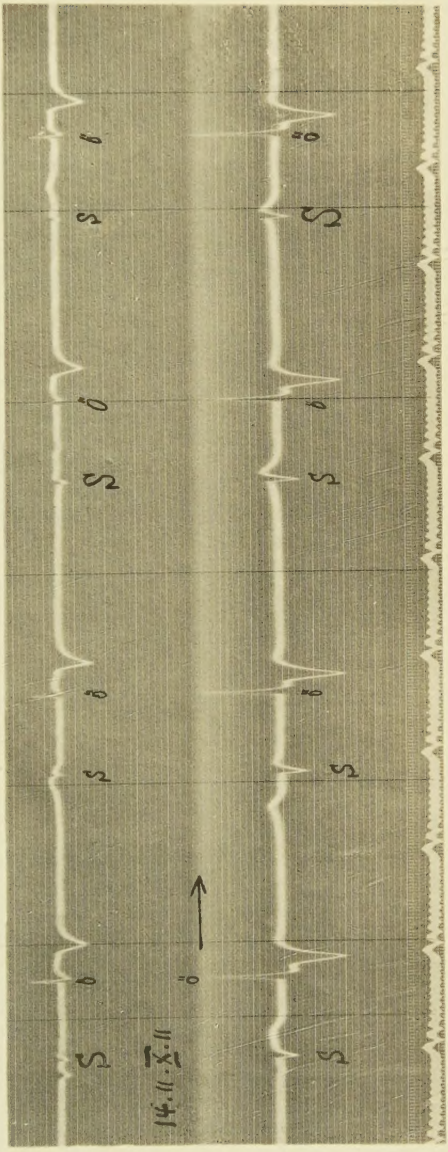
15

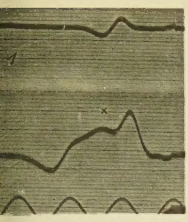


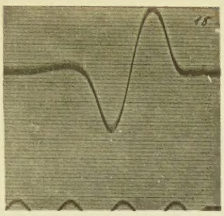
16

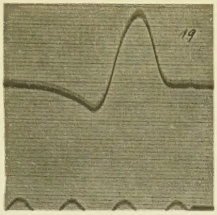


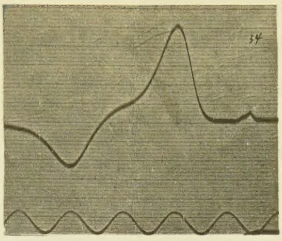
17

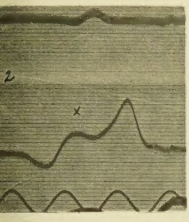


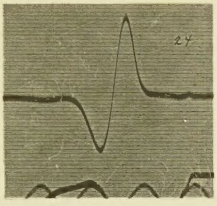

1
x

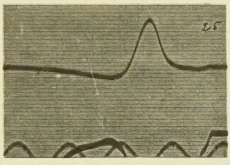

18

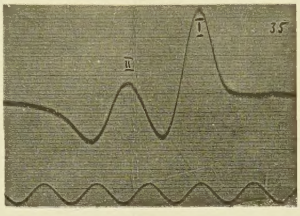

19

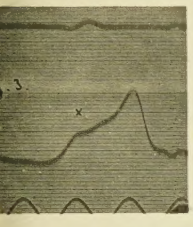

34

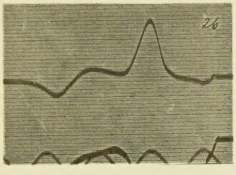

2
x

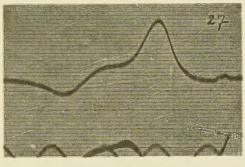

24

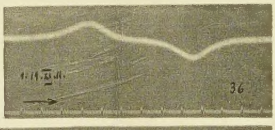

25

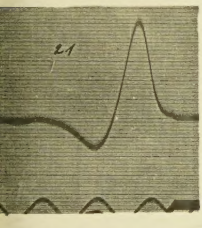

I
III
35

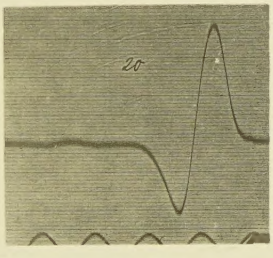

3
x

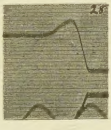

26

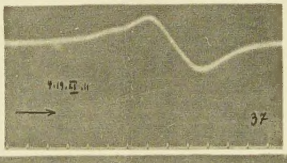

27

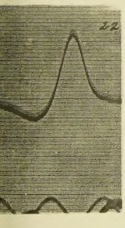

36

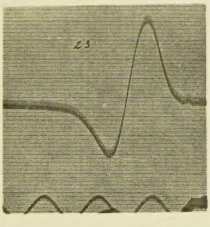

21

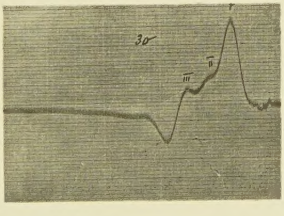

20

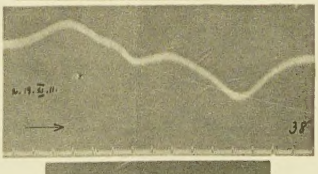

28

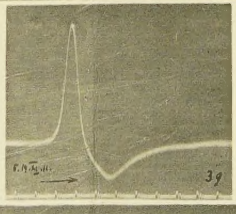

37

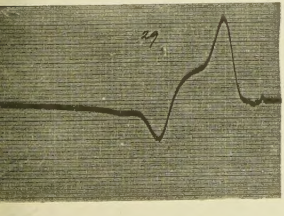

22

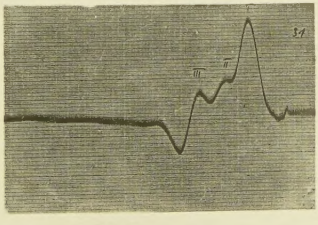

23

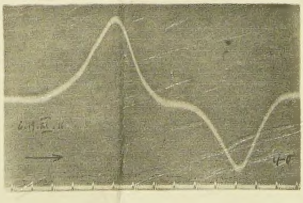

30
III
II

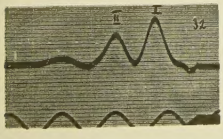

38

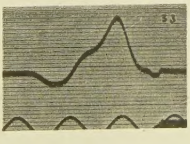

39


29


31
III
II


40


II
I
32


33